



**HAL**  
open science

# Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhauve minière (vallées de l'Ondaine et du Lizeron, bassin houiller de la Loire) : modélisation mathématique du milieu

Agnès Blachere

► **To cite this version:**

Agnès Blachere. Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhauve minière (vallées de l'Ondaine et du Lizeron, bassin houiller de la Loire) : modélisation mathématique du milieu. Sciences de l'environnement. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1985. Français. NNT : . tel-00850302

**HAL Id: tel-00850302**

**<https://theses.hal.science/tel-00850302>**

Submitted on 6 Aug 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ACADEMIE DE MONTPELLIER  
Université des Sciences  
et  
Techniques du Languedoc

Ecole Nationale Supérieure  
des Mines de Saint-Etienne

## THESE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
pour obtenir le diplôme de Doctorat spécialité Géologie Appliquée

### **Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhauve minière**

(Vallées de l'Ondaine et du Lizeron, Bassin houiller de la Loire)

### **Modélisation mathématique du milieu**

par

**Agnès BLACHERE**

TOME 1

Soutenue le 21 Octobre 1985 devant le jury composé de :

M. C. DROGUE : Président

P. DAVOINE

B. BLAVOUX

A. DESBOIS

N. MONGEREAU

M. A. GIRARD

46 270

02/10/83

ACADEMIE DE MONTPELLIER  
Université des Sciences  
et  
Techniques du Languedoc

Ecole Nationale Supérieure  
des Mines de Saint-Etienne

# THESE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
pour obtenir le diplôme de Doctorat spécialité Géologie Appliquée



## **Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhaure minière**

(Vallées de l'Ondaine et du Lizeron, Bassin houiller de la Loire)

## **Modélisation mathématique du milieu**

par

**Agnès BLACHERE**

TOME 1



Soutenue le 21 Octobre 1985 devant le jury composé de :

- MM. C. DROGUE : Président
- P. DAVOINE
- B. BLAVOUX
- A. DESBOIS
- N. MONGEREAU
- M<sup>le</sup> M. A. GIRARD

217 PC 11

## AVANT-PROPOS

*Je remercie ici,*

*Monsieur Claude DROGUE, Directeur du Laboratoire d'Hydrogéologie et Professeur à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, qui m'a fait confiance et conseillé pour ce travail;*

*Monsieur André DESBOIS, Directeur des houillères d'Auvergne et de la Loire, Ingénieur des Mines, qui a commandé ce travail, qui l'a rémunéré et qui a accepté de faire partie du jury;*

*Monsieur BLAVOUX, Président de la Faculté des Sciences d'Avignon et Professeur d'hydrochimie, qui a suivi mon travail et accepté de faire partie du Jury de cette thèse;*

*Mademoiselle Marie-Agnès GIRARD, Informaticienne du Département Stratégie du Développement de l'Ecole Nationale Supérieure de Mines de Saint-Etienne, Docteur en Automatique et Informatique, pour sa large participation à la mise au point des programmes informatiques réalisés et pour sa participation au jury de cette thèse;*

*Monsieur RICHARD, Directeur du Laboratoire Municipal de la Ville de Saint-Etienne qui a analysé les échantillons d'eau prélevés dans les vallées de l'Ondaine et du Lizeron et qui m'a fourni de précieux conseils pour l'interprétation des analyses;*

*Messieurs MOULEYRE et BLIGNY MOREL de la DRIR, avec lesquels nous avons eu de nombreuses et fructueuses discussions;*

*Monsieur JULIEN, Directeur du Domaine, Messieurs SAMOUILLE, TOURVIEILLE, MEYER et BEAL, fidèles et efficaces interlocuteurs des Houillères du Bassin de la Loire;*

*Messieurs MOUNIOULIOUX, MURCIA et JAQUEMONT des Houillères du bassin de la Loire, pour leur aide précieuse sur le terrain;*

*Monsieur BROUILLET et tous les membres des Houillères qui ont eu l'occasion de m'aider dans mon travail;*

*Mes parents, qui m'ont appris l'esprit naturaliste et qui m'ont soutenue moralement et financièrement tout-au-long de mes études;*

*L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne qui m'a accueillie dans ses locaux, Monsieur Albert MATHON, Directeur du Département Stratégie du Développement et tout particulièrement Monsieur ROELENS, professeur de travaux souterrains, et Monsieur TOUCHARD, professeur de mécanique des fluides, pour m'avoir fait bénéficier de leurs compétences.*

*Monsieur CHEMEL pour son aide technique et Messieurs DARLES, VELAY et LOUBET qui ont travaillé à l'impression de ce document, Madame BROUILLET en liaison avec les Houillères;*

*Messieurs et Mesdames les chimistes de la Centrale Thermique du BEC ;*

*Tous les membres du Département Stratégie du Développement, pour l'ambiance agréable qui règne dans leur locaux;*

*Je réserve les dernières lignes de cet avant-propos à Monsieur Philippe DAVOINE, Maître de Recherche, Professeur d'Hydrogéologie à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, qui a suivi de très près l'élaboration de cette thèse, m'a appris à travailler de façon efficace, a su promouvoir ses conseils judicieusement et relancer ce travail dans les moments difficiles. Pour toutes ces raisons, je tiens à le remercier chaleureusement.*

TOME N°1

Avant-propos

Liste des figures

Liste des abréviations

Lexique des mots spécifiques

INTRODUCTION GENERALE 1

PREMIERE PARTIE

## Présentation générale du milieu

I	- Cadre géographique	3
	I-1 - Géomorphologie	3
	I-2 - Hydrologie	3
	I-3 - Géographie humaine	6
II	- Bref historique de l'extraction du charbon dans le bassin houiller de la Loire	6
III	- Contexte géologique	13
	III-1 - Généralités	13
	III-2 - Lithostratigraphie	15
	III-3 - Tectonique	16
IV	- Influence de l'exploitation minière sur les terrains environnants	24
	IV-1 - Introduction	24
	IV-2 - Effets des travaux souterrains en profondeur	24
	IV-2-1 - Galeries	
	IV-2-2 - Tailles	
	IV-3 - Influence en surface	31
	IV-3-1 - Affaissements	
	IV-3-2 - Autres influences	
	IV-4 - Conclusions	37
V	- Place du site de notre étude dans le cadre régional	38

DEUXIEME PARTIE

## Etude hydrogéologique de l'influence de l'arrêt de l'exhaure minière

I	- Introduction	40
II	- Définition des systèmes aquifères et bilan en eau	40
	II-1 - Définition des systèmes aquifères	40
	II-1-1 - Les terrains houillers	
	II-1-1-1 - Description des terrains	
	II-1-1-2 - Détermination des caractéristiques	
	II-1-1-3 - Interprétation géométrique du réservoir	
	II-1-1-4 - Description du système aquifère minier	
	II-1-2 - Nappes superficielles	
	II-1-3 - Conclusions et schématisation du milieu	
	II-2 - Bilan en eau du système	58
	II-2-1 - Eaux de surface	
	II-2-1-1 - Ondaine	
	II-2-1-2 - Lizeron	
	II-2-2 - Pluie - Evapotranspiration	
	II-2-3 - Bilan annuel des bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron	
	II-2-4 - Bilan en eau des différentes concessions	
	II-2-5 - Interprétation des résultats	
III	- Essai de localisation des zones possibles d'émergence d'eau de mine	66
	III-1 - Définition, rappels, sites d'émergence privilégiés	66
	III-2 - Comportement hydraulique possible des différentes zones exploitées	68
	III-3 - Etude détaillée des différentes concessions et de leurs zones vulnérables	76
	III-3-1 - Introduction	
	III-3-2 - La Tour	
	III-3-3 - Malafolie	
	III-3-4 - Varenne	
	III-3-5 - Roche-la-Molière	
	III-3-6 - Montrambert	
	III-3-7 - La Beraudière	
	III-4 - Proposition d'une stratégie de surveillance	92
	III-5 - Solutions à adopter en cas d'apparition d'un émergence	98
	III-5-1 - Présentation	
	III-5-2 - Les solutions pour les zones vulnérables des vallées de l'Ondaine et du Lizeron.	

TROISIEME PARTIE

## Analyse chimique - Agressivité des eaux de mine vis-à-vis des bétons

I	- Introduction	108
II	- Etude chimique des eaux des vallées de l'Ondaine et du Lizeron	
	II-1 - Choix de l'emplacement des prélèvements	108
	II-2-1 - Eaux prélevées en surface	
	II-2-2 - Eaux prélevées dans la mine	
	II-2 - Environnement	111
	II-3 - Présentation des résultats	112
	II-3-1 - Eaux prélevées en surface	
	II-3-2 - Eaux prélevées dans la mine	
	II-4 - Interprétation générale des analyses d'eaux prélevées en surface	114
	II-4-1 - Comparaison des échantillons	
	II-4-2 - Analyse en composantes principales	
	II-4-2-1 - Présentation de la méthode	
	II-4-2-2 - Interprétation des résultats	
	II-4-3 - Représentation diagrammatique des analyses	
	II-4-3-1 - Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF	
	II-4-3-2 - Diagramme de PIPER	
	II-4-4 - Conclusions	
	II-5 - Etude des analyses des eaux provenant de la mine	128
	II-5-1 - Approche générale-comparaison des individus	
	II-5-2 - Analyse en composantes principales	
	II-5-3 - Représentations diagrammatiques	
	II-5-3-1 - Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF	
	II-5-3-2 - Diagramme de PIPER	
	II-5-4 - Interprétation	
	II-5-4-1 - Cas général	
	II-5-4-2 - Cas particuliers	
	II-5-5 - Conclusions	
	II-6 - Conclusions générales concernant la qualité des eaux des vallées de l'ondaine et du Lizeron	144
III	- Agressivité des eaux vis-à-vis des bétons	145
	III-1 - Etude bibliographique	145
	III-1-1 - Rappels	
	III-1-1-1 - Le ciment	
	III-1-1-2 - Différents types de ciment	

III-1-1-3 - Mécanismes d'hydratation des ciments	
III-1-1-4 - Caractéristiques du béton	
III-1-2 - Durabilité des bétons	153
III-1-2-1 - Facteurs modifiant la durabilité des bétons	
III-1-2-2 - Types d'attaque chimique des bétons	
III-1-3 - Eaux agressives vis-à-vis des bétons	
III-1-4 - Normes de limitation d'emploi des ciments en milieu séléniteux	
III-1-5 - Qualité des bétons de fondation de la région stéphanoise	
III-1-6 - Principaux essais permettant d'apprécier l'altérabilité des bétons	
III-1-7 - Conclusions	
III-2 - Essais in-situ sur des éprouvettes de béton (2x2x16 cm)	165
III-2-1 - Introduction	
III-2-2 - Méthode utilisée	
III-2-3 - Mise en place - Outils	
III-2-4 - Résultats et commentaires	
III-2-5 - Conclusions	

TOME N°2

QUATRIEME PARTIE

Modélisation du milieu assistée par ordinateur

I - Introduction - Buts de la modélisation	178
II - Méthodes de modélisation adoptées	
II-1 - Présentation de cas de modélisation d'aquifères miniers	178
II-2 - Difficultés de modélisation d'un aquifère minier	179
II-3 - Choix des méthodes de modélisation	180
III - Modélisation par la méthode des éléments finis	181
III-1 - Principes de la discrétisation, rappel de la méthode	181
III-2 - Le maillage	182
III-3 - Présentation de la bibliothèque ELFI- Application au site étudié	183
III-4 - Problèmes soulevés par l'adaptation de la méthode à un cas de remontée du niveau d'eau	188
III-5 - Conclusions	190

	PAGE
IV - Modélisation par le procédé des différences finies	191
IV-1 - Rappels - équations et lois utilisées	191
IV-2 - Présentation du logiciel	192
IV-2-1 - Description de l'ensemble du logiciel	193
IV-2-2 - Les données - Introduction, modifications	196
IV-2-3 - Les programmes de calcul	198
IV-2-3-1 - Conditions aux limites	
IV-2-3-2 - Adaptation de la méthode à une modélisation en coupe	
IV-2-3-3 - Les programmes	
IV-3 - Utilisation du logiciel-simulation de l'arrêt de l'exhaure dans les vallées de l'Ondaine et du Lizeron	
IV-3-1 -Le système étudié, les données	208
IV-3-2 -Calage du modèle pour la concession de Roche-la-Molière	212
IV-3-2-1 - Présentation	
IV-3-2-2 - Choix du pas de temps	
IV-3-2-3 - Résultats	
IV-3-2-4 - Observations	
IV-3-2-5 - Comparaison entre les paramètres hydrodynamiques obtenus par simulation, et les données de terrain	
IV-3-3 - Simulation dans les autres concessions	229
IV-3-3-1 - Méthode d'estimation des paramètres hydrodynamiques	
IV-3-3-2 - Situation et description des coupes	
IV-3-3-3 - Les simulations effectuées	
IV-3-3-4 - Résultats	
V - Conclusions	251
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	254
Bibliographie	257

#### ANNEXES

N°1 : Carte-Bassin houiller de la Loire-Région occidentale et centrale- plan d'ensemble des travaux	
N°2 : Résultats des essais par pompage dans les piézomètres	264

	<i>PAGE</i>
<i>N°3 : Coupes géologiques des piézomètres</i>	<i>269</i>
<i>N°4 : Arrêté préfectoral relatif au suivi de la remontée des eaux dans les travaux</i>	<i>274</i>
<i>N°5 : Reflexion sur la mise en place d'un système d'interprétation des données relatives au dossier de délaissement des houillères du bassin de la Loire</i>	<i>283</i>
<i>N°6 : Fiche analytique des échantillons d'eau prélevés pour le "point zéro"</i>	<i>289</i>
<i>N°7 : Processus de noyage/dénoyage</i>	<i>315</i>
<i>N°8 : Les données de la coupe Est-Ouest</i>	<i>319</i>

## LISTE DES FIGURES

### PREMIERE PARTIE

- 1-1 : Localisation géographique du bassin houiller de la Loire
- 1-2 : Bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron
- 1-3 : Tableau et courbe d'extraction nette de houille et de lignite
- 1-4 : Description géologique du bassin houiller
- 1-5 : Echelle stratigraphique du bassin houiller
- 1-6 : Position stratigraphique du faisceau de la Talaudière
- 1-7 : Le comble sud
- 1-8 : Carte tectonique du bassin houiller
- 1-9 : Accidents cassants des Cévennes septentrionales
- 1-10 : Mise en place des unités charriées
- 1-11 : Courbes d'iso-contrainte autour d'une galerie
- 1-12 : Limite d'influence du creusement d'une galerie
- 1-13 : Influence d'un front de taille
- 1-14 : Pression mesurée au passage d'un front de taille
- 1-15 : Déplacement des terrains en % de la puissance de la couche
- 1-16 : Fissuration engendrée par l'abatage au toit des travaux
- 1-18 : Zone d'influence d'une couche exploitée
- 1-19 : Notion d'angle limite
- 1-20 : "
- 1-21 : "
- 1-22 : Contraintes mesurées en surface
- 1-23 : Influence d'une exploitation présentant un pendage
- 1-24 : Abaque d'influence d'une exploitation présentant un pendage
- 1-25 : Règle de la tangente complétée
- 1-26 : "

## DEUXIEME PARTIE

- 2-1 : Courbe de remontée du niveau d'eau, division de Roche-la-Molière
- 2-2 : Schéma interprétatif de l'aquifère lié à la mine
- 2-3 : Schéma structural de l'aquifère minier
- 2-4 : Carte d'emplacement des nappes superficielles
- 2-5 : Les niveaux d'eau avant arrêt de l'exhaure
- 2-6 : Tableau récapitulatif des zones d'émergence possibles
- 2-7 : Mesures de pression au serrement du T.B. cote 11
- 2-8 : Relations entre les concessions de Montrambert et La Béraudière
- 2-9 : Carte des zones vulnérables, division de La Tour
- 2-10 : " " , division de Malafolie
- 2-11 : " " , division de Varenne
- 2-12 : Isolement de la partie nord de la division de Varenne
- 2-13 : Carte des zone vulnérables, division de Roche-la-Molière
- 2-14 : " " , concession de Montrambert
- 2-15 : Les travaux de la concession de la Béraudière, position topographique
- 2-16 : Carte des zones vulnérables, concession de La Béraudière
- 2-17 : Concession de La Béraudière, couches de la Chauvetière
- 2-18 : Parcours du tunnel SNCF de la Croix de l'Orme
- 2-19 : Coupe géologique passant par le tunnel SNCF de la Croix de l'Orme
- 2-20 : Fiche technique des piézomètres
- 2-21 : Solution proposée pour une émergence en zone rurale
- 2-22 : " " émergence en zone urbanisée à pente faible
- 2-23 : " " émergence en zone urbanisée à pente forte
- 2-24 : Type probable de l'émergence dans la vallée de l'Ondaine
- 2-25 : Type probable de l'émergence dans la vallée du Lizeron

### TROISIEME PARTIE

- 3-1 : Tableau de provenance des eaux prélevées en surface
- 3-2 : Tableau de l'analyse des eaux prélevées en surface (mg/l)
- 3-3 : Tableau de l'analyse des eaux prélevées dans la mine (mg/l)
- 3-4 : " " " " en surface (mé/l)
- 3-5 : Tableau de dispersion des valeurs de concentration (mé/l)
- 3-6 : Tableau de la balance ionique des eaux prélevées en surface
- 3-7 : Tableau de résultat de l'ACP des eaux prélevées en surface
- 3-8 : Diagramme de résultat de l'ACP des eaux prélevées en surface
- 3-9 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff, eaux "de mine"/eaux de surface
- 3-10 : " " " " , eau de l'Ondaine
- 3-11 : " " " " , eau d'exhaure Roche-la-Molière
- 3-12 : " " " " , eau de la Pommaraise
- 3-13 : Diagramme de Piper, eaux prélevées en surface
- 3-14 : Tableau de l'analyse des eaux prélevées dans la mine (mé/l)
- 3-15 : Tableau de la balance ionique des eaux prélevées dans la mine
- 3-16 : Tableau du rapport Na/Ca+Mg (mé/l), eaux prélevées dans la mine
- 3-17 : Tableau de résultat de l'ACP des eaux prélevées dans la mine
- 3-18 : Diagramme de résultat de l'ACP, " " " "
- 3-19 : Différents faciès d'eau "de mine", diagramme de Schoeller-Berkaloff
- 3-20 : Diagramme de Piper des eaux prélevées dans la mine
- 3-21 : " " " " "
- 3-22 : Diagramme de Piper, eaux des mines des Rocheuses (Canada)
- 3-23 : Schéma récapitulatif de l'analyse des eaux
- 3-24 : Tableau des normes d'agressivité des eaux vis-à-vis des bétons
- 3-25 : Tableau récapitulatif de la qualité des eaux sur le site étudié
- 3-26 : Moule réalisé pour la fabrication des éprouvettes
- 3-27 : Principe de fonctionnement, micromètre à pression d'air (ETAMIC)
- 3-28 : Qualité des eaux, émergences du Cluzel, de Villars, de la Sauvagère
- 3-29 : Résultats des mesures effectuées sur les éprouvettes
- 3-30 : " " " " "

QUATRIEME PARTIE

- 4-1 : Discrétisation d'une coupe par la méthode des éléments finis
- 4-2 : Coupe géologique Nord-Sud
- 4-3 : Discrétisation de la coupe Nord-Sud " " "
- 4-4 : Principe de modification du maillage (programme MODIF 2)
- 4-5 : Régime permanent et régime transitoire dans l'aquifère minier
- 4-6 : Déformation du maillage Nord-Sud
- 4-7 : Enchaînement des programmes de gestion des données
- 4-8 : Unité de traitement relative au fonctionnement des programmes de calcul
- 4-9 : Exemple de fonctionnement du programme INITAB
- 4-10 : " " " MODTAB
- 4-11 : " " " LIS
- 4-12 : Conditions aux limite de type Neuman
- 4-13 : Maillage aux différences finies en coupe
- 4-14 : Procédure de calcul itératif de H
- 4-15 : Sous-programme MODEB
- 4-16 : Sous-programme IMPOT
- 4-17 : Algorithme général du programme TRANSIT
- 4-18 : Procédure de calcul de H(I,J)
- 4-19 : Maillage de discrétisation, division de Roche-la-Molière
- 4-20 : Tableau de résultat des simulations effectuées sur Roche-la-Molière
- 4-21 : Courbes de remontée simulée et mesurée dans la division de "
- 4-22 : Ecart absolu et relatif entre courbe réelle et simulée
- 4-23 : Optimisation de OMEGA
- 4-25 : Simulation de l'exhaure minière Pennsylvanie (USA)-A.S.C OWILI-EGER
- 4-26 : Valeurs de la transmissivité calées sur Roche-la-Molière
- 4-27 : Valeurs du coefficient d'emménagement " "
- 4-28 : Relation entre l'intensité des travaux et les paramètre T et S
- 4-29 : Courbe de remontée prévue par l'exploitant, division de Roche-la-Molière
- 4-30 : Report graphique des panneaux exploités
- 4-31 : Histogramme d'intensité des travaux
- 4-32 : Maillage coupe Nord-Sud
- 4-33 : Maillage coupe Est-Ouest
- 4-34 : Largeur des coupes matérialisée en plan
- 4-35 : Courbe de remontée jusqu'à émergence, division de Roche-la-Molière
- 4-36 : " " " " , concession de La Béraudière
- 4-37 : " " " " , Montrambert, Varenne, Malafolie
- 4-38 : Représentation des niveaux d'eau à différents pas de temps
- à-42 : de la simulation pour la coupe Est-Ouest

## LISTE DES ABREVIATIONS

- A.C.P. : Analyse en Composante Principale  
C.E.T.E : Centre d'Etude Technique de l'Equipement  
D.D.A. : Direction Départementale de l'Agriculture  
D.D.A.S.S. : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales  
D.D.E. : Direction Départementale de l'Equipement  
D.R.I.R. : Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche  
EPURES : Association pour l'Etude des Plans d'Urbanisme de la Région  
Stéphanoise  
G.E.P. : Groupe d'Etude et de Programmation  
H.B.C.M. : Houillères des Bassins du Centre et du Midi  
H.B.L. : Houillères du Bassin de la Loire  
NC : Nombre de colonnes  
NL : Nombre de Lignes  
P : Perméabilité  
P.O.S. : Plan d'Occupation des Sols  
R.L.M. : Roche-la-Molière  
S : Coefficient d'emmagasinement  
S.N.C.F. : Société Nationale des Chemins de Fer  
S.R.A.E. : Service Régional de l'Aménagement des Eaux  
T : Transmissivité  
T.B. : Travers-Banc

### Lexique du vocabulaire spécifique

- Abatage : Effondrement des terrains provoqué à l'arrière du front de taille.
- Affleurement : Ce mot est en général réservé aux affleurements de couches de charbon.
- Comble : Zone de dépôt des sédiments carbonifères dans le bassin houiller de la Loire
- Concession : Ancien terme désignant une zone d'exploitation dépendant d'une même direction.
- Couche : Désigne une couche de charbon exploitée.
- Découverte : Exploitation de charbon à l'affleurement, depuis la surface.
- Division : Partie d'une concession
- Exhaure : Pompage de l'eau vers la surface, assurant le dénoyage des travaux en cours (pompage à niveau constant).
- Fendue : Galerie inclinée utilisée pour l'exploitation de couches de charbon proches de la surface et débouchant au jour.
- Fond : Mine souterraine.
- Jour : Surface du sol
- Mort-terrain : Tous les terrains autres que du charbon.
- Puisard : Fond de puits de mine dans lequel s'accumulent les eaux.
- Recette : En exploitation souterraine, galerie de liaison entre la taille et le puits.
- Schlamm : Résidu très fin qui provient du concassage du charbon, ou des bassins de décantation
- Soutènement : Matériel utilisé pour soutenir les terrains dans les galeries et les fronts de taille de la mine.
- Taille : Zone d'extraction du charbon au fond.
- Terril : Accumulation en surface des morts-terrains issus de la mine.
- Travers-banc : Galerie horizontale au rocher reliant deux zones d'exploitation.
- Stampes : Couches géologiques associées au charbon.

INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE - PRESENTATION DU SUJET

La région de Saint-Étienne est depuis fort longtemps le siège d'importantes exploitations de charbon qui ont été depuis le moyen-âge la base de l'économie régionale.

La présence des mines dans le sous-sol de cette région a entraîné des bouleversements (géologiques et hydrogéologiques) qui ont créé dans le secteur un milieu souterrain particulier, différent du milieu naturel originel, et dont la structure est issue du travail de l'homme.

Actuellement dans toute la France, l'exploitation du charbon connaît un déclin important qui n'a pas épargné le bassin houiller de la Loire dont la dernière exploitation souterraine a cessé au mois d'octobre 1983 (vallée de l'Ondaine, La Ricamarie, secteur ouest de Saint-Etienne).

Toute cessation d'activité souterraine s'accompagne en générale d'un arrêt des pompages d'exhaure jusqu'alors assurés pour maintenir hors d'eau les zones exploitées.

Sous la ville de Saint-Etienne, l'arrêt de l'exhaure est effectif depuis une quinzaine d'années et s'est accompagné de l'apparition d'eau de mine en surface aussi bien dans des zones agricoles que dans des zones urbanisées avec tous les inconvénients que cela comporte.

Les houillères de la Loire ont donc souhaité faire faire une étude prévisionnelle concernant les influences possibles de l'arrêt de l'exhaure dans la vallée de l'Ondaine : il s'agit là du sujet de notre étude.

La première partie de ce travail consiste en une présentation générale du site avec les particularités qu'il comporte.

La deuxième partie de cet ouvrage sera au contraire consacrée à une étude spatiale plus précise du secteur concerné. La démarche générale entreprise, dans ce but, consiste, à partir des données synthétiques disponibles, à déterminer un certain nombre d'hypothèses concernant la localisation des zones vulnérables vis à vis de ce problème. Ces hypothèses guideront le choix des sites dont l'étude est approfondie. Après avoir défini les systèmes aquifères, effectué

un bilan en eau, et localisé les zones d'émergence possibles des eaux de mine, nous proposerons ensuite une stratégie de surveillance de ces sites vulnérables.

Dans le cadre d'une troisième partie, une étude chimique approfondie de la qualité des eaux permettra de définir les paramètres distinctifs entre des eaux ayant transité dans la mine et les eaux de surface. La connaissance, ainsi approfondie, de la qualité des eaux "de mine" nous permettra d'étudier leur agressivité éventuelle (mesurée entre autre par des essais in-situ) vis à vis des bétons.

Enfin, la quatrième partie cherchera à mieux connaître le comportement hydraulique du milieu dans le temps. Pour cela, un certain nombre de ses propriétés physiques doivent être déterminées, ce type de données étant rarement accessibles, le recours à la modélisation assistée par ordinateur du milieu minier constitue la méthode d'approche utilisée. Un modèle mathématique utilisant la méthode des différences finies (modèle bidimensionnel en coupe) et adapté au domaine d'étude a été élaboré. Nous en présentons la mise au point et les résultats des simulations effectuées.

PREMIERE PARTIE

PRESENTATION GENERALE DU MILIEU

## I - CADRE GEOGRAPHIQUE

### I-1 - Géomorphologie

L'étude entreprise porte sur les vallées de l'Ondaine et du Lizeron situées dans le bassin houiller de la Loire : dépression sédimentaire carbonifère orientée NE-SW, limitée au nord par les monts du Lyonnais, au sud par le massif du Pilat, et à l'ouest par les monts du Forez (Carte n°1-1).

Les monts du Lyonnais sont constitués d'une succession de chaînons de même orientation que le bassin houiller, et dont le point culminant est le Signal Saint-André (957 m).

Le massif du Pilat culmine à 1434 m au crêt de l'Oeillon .

Dans le bassin sédimentaire stéphanien, l'altitude varie de 450 m en moyenne à l'ouest, à 250 m à l'est ; le point culminant se situe à Saint-Etienne (664 m).

### I-2 - Hydrologie

Trois cours d'eau principaux parcourent le bassin houiller de la Loire; il s'agit du Gier à l'est, de l'Ondaine et du Furan à l'ouest.

Les bassins versants du Gier et du Furan déterminent la ligne de partage des eaux superficielles entre le Rhône et le Loire.

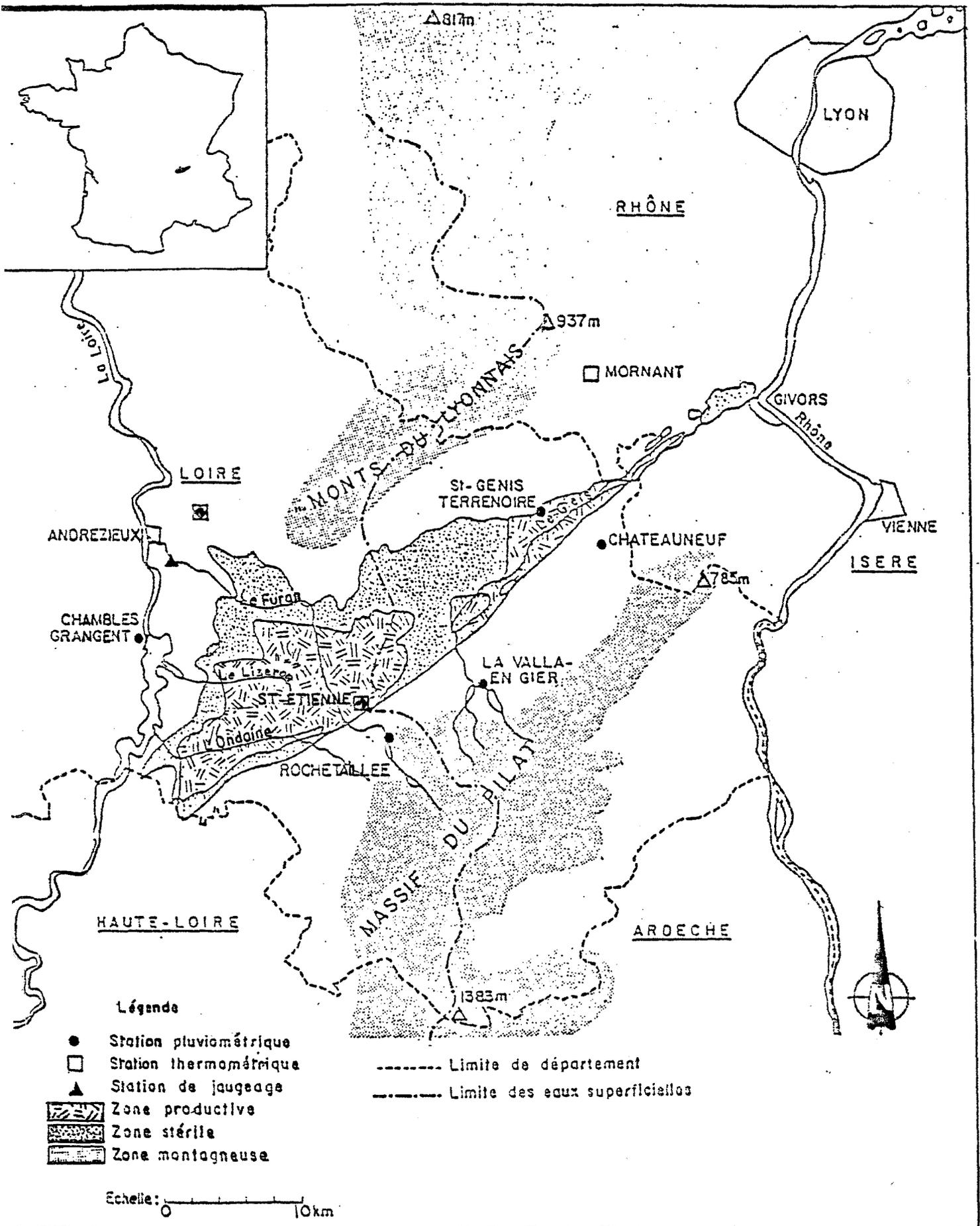
L'Ondaine et le Lizeron sont des affluents rive droite de la Loire, s'écoulant approximativement d'est en ouest (carte n°1-2) pour se jeter dans la retenue d'eau créée par l'Aménagement Hydraulique de la Loire à Grangent.

Le bassin versant de l'Ondaine couvre une surface d'environ 120 Km<sup>2</sup> entre Saint-Etienne et la Loire.

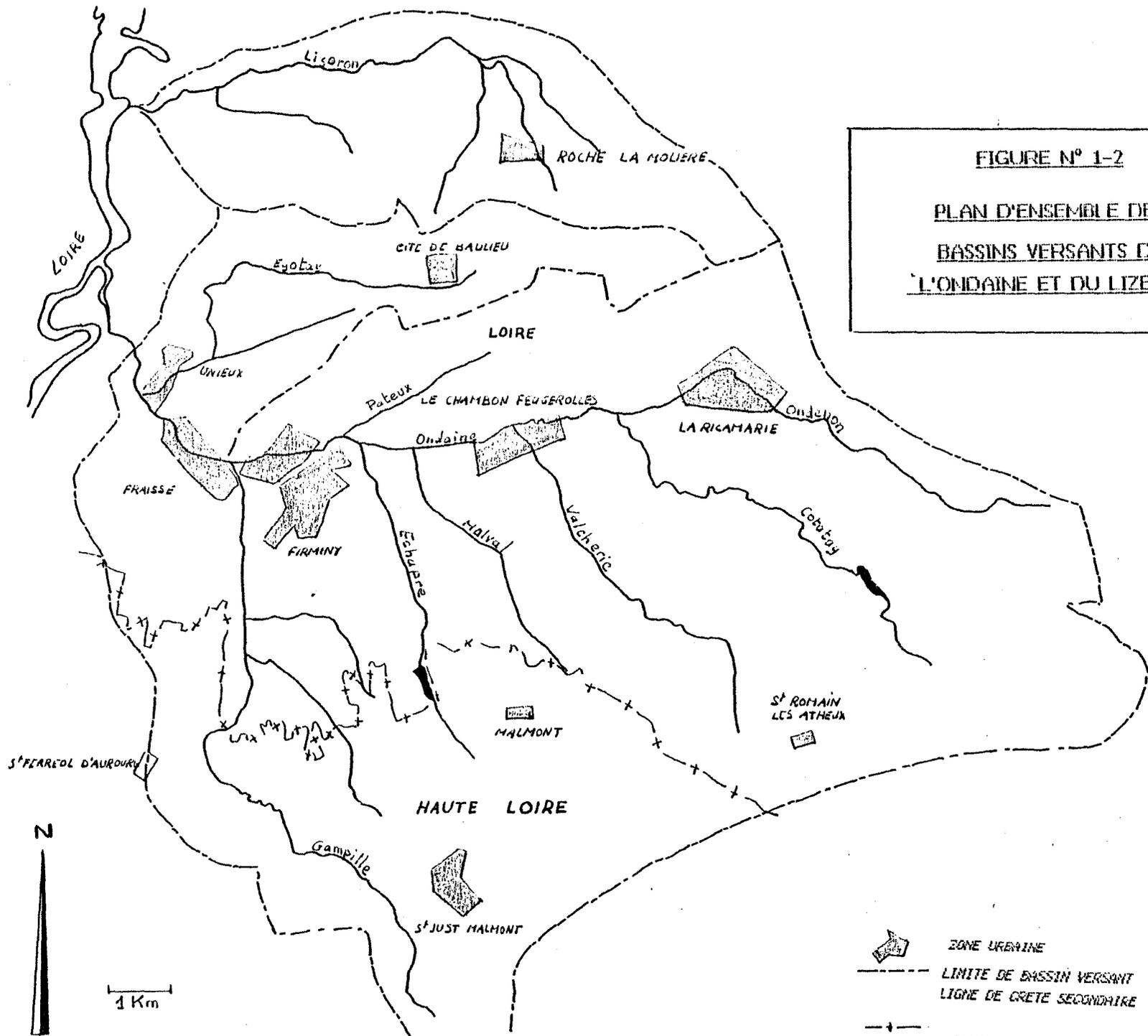
Perpendiculairement à l'Ondaine, plusieurs affluents issus soit des monts du Pilat, soit du bassin houiller découpent le périmètre en 9 sous-bassins versants de pente souvent accentuée.

Le débit moyen de l'Ondaine estimé à l'aide d'études comparatives des divers types de bassins versants rencontrés dans la région (SRAE

**LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN HOUILLER DE LA LOIRE**



**FIGURE N° 1-1**



**FIGURE N° 1-2**  
**PLAN D'ENSEMBLE DES**  
**BASSINS VERSANTS DE**  
**L'ONDAINE ET DU LIZERON**

Rhône-Alpes 1982) est de l'ordre de 695 l/s.

Le bassin versant du Lizeron a une surface de 30 Km<sup>2</sup>, son débit moyen est de 1301/s.

La pluviométrie moyenne annuelle de la région est de l'ordre de 800 mm.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode de Torntwaite est de 580 mm/an.

### I-3 - Géographie humaine

Le bassin houiller de la Loire est une voie de passage privilégiée entre les deux grandes vallées de la Loire et du Rhône (création des deux premières lignes de chemin-de-fer en France); l'exploitation du charbon y a attiré depuis longtemps de nombreuses industries.

Les trois rivières principales parcourant ce bassin traversent donc des zones industrielles importantes : de part et d'autre du lit de l'Ondaine, la zone linéaire fortement urbanisée de La Ricamarie, Le Chambon-Feugerolles, Firminy, Unieux représente une surface d'environ 14 Km<sup>2</sup> dans laquelle ont subsisté jusqu'en 1983 les derniers puits de mine en exploitation.

## II - BREF HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION DU CHARBON DANS LE BASSIN HOUILLER

\* De 1300 à 1744 : Période des exploitations privées disséminées.

C'est en 1321 qu'apparaît le premier manuscrit relatant l'existence de charbon dans le bassin houiller de la Loire à Rochemayère (Roche-la-Molière). Ce charbon à l'affleurement, est utilisé par les laboureurs pour le chauffage domestique et la forge du métal.

Jusqu'en 1744 chacun fait sa "taupière" ; les propriétaires afferment leurs "carrières" pour un ou deux ans moyennant une redevance en nature.

Depuis 1740 exploitations par puits prennent de l'importance (diamètre allant jusqu'à 2,30 m et profondeur allant jusqu'à 120 mètres). Les

treuils de ces puits sont actionnés au jour par des manèges à chevaux et les machines à vapeur ont remplacé les pompes rudimentaires en bois actionnées à la main.

Rive de Gier exporte chaque jour son charbon vers Condrieu et Givors sur le Rhône par voie de terre. A Saint-Etienne, le charbon exploité est utilisé en grande partie sur place (forges, armuriers, arquebusiers) ; le reste est acheminé à dos de mulets jusqu'à la Loire par laquelle il arrivera jusqu'à Paris par l'intermédiaire du canal de Briare.

Pour toutes ces exploitations, les dangers constants restent l'eau, le feu et le grisou.

C'est à cette époque (1730) que l'on commence à faire des relevés de plans mais la multiplicité des exploitations, l'ignorance des exploitants, leur manque de capitaux rendent tout progrès très laborieux.

\* De 1744 à 1946 Période des regroupements d'exploitations en compagnies de plus en plus importantes.

En 1744, interdiction est faite aux petits propriétaires d'exploiter le sous-sol afin d'éviter la dévastation -ces derniers se regroupent donc en petites mais trop nombreuses compagnies.

Le premier bilan d'exploitation générale apparaît en 1752 et mentionne une production totale de plus de deux cent mille tonnes pour l'année dans le bassin.

En 1768 le duc de Charost obtient du roi la concession des mines de Roche la Molière ; il en résulte une mine plus grande sous la direction d'un ingénieur géomètre. On s'occupe même de créer à Roche-la-Molière une école professionnelle. Mais deux ans plus tard, ruinée par les exigences des propriétaires et des extracteurs, la société renonce à son entreprise.

En 1782 on dénombre donc 45 mines privées sur le seul bassin de Saint-Etienne.

En 1784, nouvelle tentative à Roche-la-Molière : la concession est accordée pour 30 ans à une nouvelle compagnie qui devra aussi, aussitôt renoncer devant les protestations des propriétaires ; la compagnie d'Osmond

reprend alors les droits et entreprend une véritable exploitation (120 tonnes par jour). Les agents de cette compagnie sont exclusés par une troupe de gens armés en 1789 et les propriétaires du sol reprennent la mine.

Jusqu'en 1800 le charbon est souvent remonté à dos d'homme par des galeries à fortes pentes ; il est prévu 74 kg pour un homme, 50 kg pour une femme et 25 kg pour un enfant ; apparaissent ensuite les bennes avec traînage sur patin tirées par des hommes ou des mulets. On s'éclaire dans la mine avec des chandelles puis des lampes à huile.

En 1812 les relevés topographiques se font pour la première fois à la boussole ; on dénombre 43 mines à Saint-Etienne et Saint-Chamond et 30 mines à Rive de Gier.

C'est en 1810 qu'une loi est votée en France en faveur des concessions ; cette loi ne prendra effet qu'en 1814 par ordonnance royale.

En 1816 création, à Saint-Etienne, de l'Ecole de Mineurs (origine de l'Ecole des Mines).

En 1820 trois concessions se partagent le bassin :

- . La compagnie des Mines de Roche-la-Molière et Firminy
- . Houillères de Saint-Etienne
- . Les mines de Rive de Gier et Grand Croix.

En 1828 le premier chemin de fer de France est construit de Saint-Etienne à Andrézieux pour le transport du charbon puis en 1832 de Saint-Etienne à Lyon.

De 1854 à 1946 cinq compagnies des mines se partagent la région stéphanoise :

- . Mines de la Loire
- . Houillères de Saint-Etienne
- . Mines de Montrambert
- . Mines de Rive de Gier et de Grand Croix
- . Compagnie des Mines de Roche la Molière et Firminy.

\* De 1946 à nos jours Période de l'apogée et du déclin :

En 1946 toutes les concessions privées sont regroupées et nationalisées sous le nom de "Houillères de la Loire" : établissement public de caractère industriel et commercial.

La production du bassin est alors de 4 002 328 tonnes pour l'année ; cette production se maintiendra à peu près jusque dans les années 1957-1960.

Un décret en date du 16 avril 1968 a ensuite créé les Houillères du Bassin du Centre et du Midi qui regroupent en un seul établissement public sept bassins jusqu'alors autonomes :

- . le bassin d'Aquitaine
- . le bassin d'Auvergne
- . le bassin de Blanzky
- . le bassin des Cévennes
- . le bassin du Dauphiné
- . le bassin de la Loire
- . le bassin de Provence.

La production passe de 3 624 057 t/an en 1950 à 1 760 196 t/an en 1968, soit une diminution de plus de la moitié de la production pour les houillères de la Loire (figure et tableau n°1-3).

La concurrence des autres énergies, en particulier pour les usages domestiques, condamne donc les Houillères de la Loire à la fermeture pour 1973.

Le freinage du plan de récession, après 1974, a permis la maintenance du bassin en exploitation jusqu'en 1983 sans que la production ne cesse de diminuer.

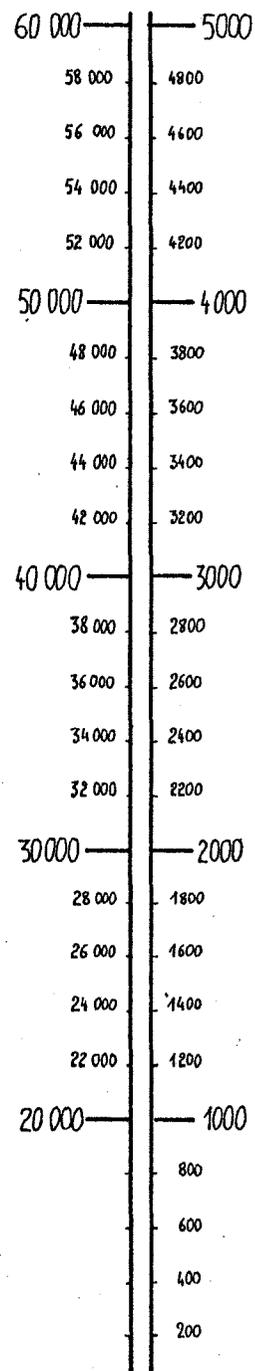
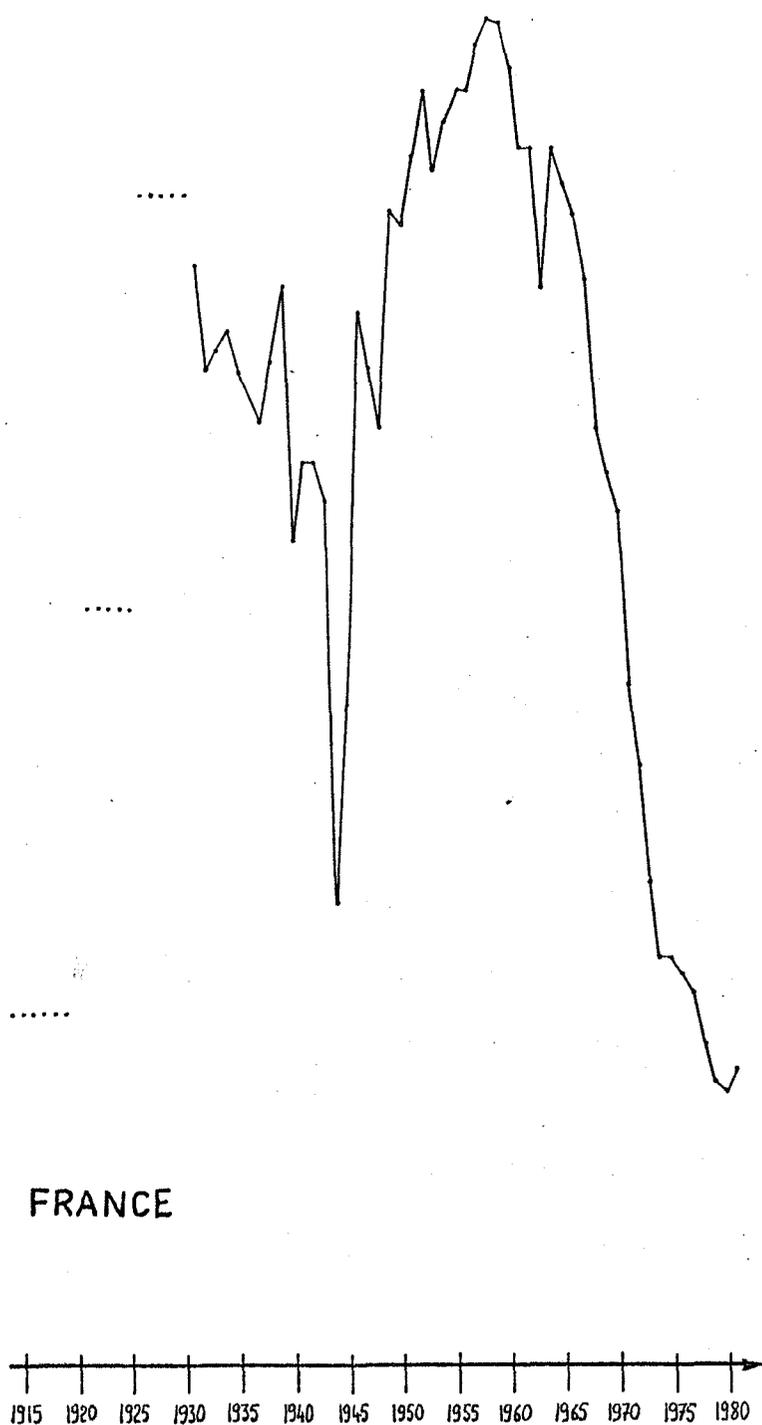
Les houillères de la Loire ferment leur dernier puits d'exploitation en octobre 1983 : il s'agit du puits Pigeot à la Ricamarie, appartenant à l'ancienne concession de Montrambert.

Pour l'année 1981 l'extraction de charbon a été de 244 000 t pour le bassin alors que l'exhaure est de 3 358 000 m<sup>3</sup>.

Milliers de tonnes .

FIGURE N° 1-3

Evolution de l'extraction  
nette de houille et de lignite



Extraction nette houille et lignite

<u>Année</u>	<u>FRANCE</u>	<u>Houillères de la Loire</u>
	(en milliers de t)	(en tonnes)
1914		3 330 937
1915		3 286 810
1916	} moyenne 23 331	3 603 475
1917		4 513 406
1918		4 918 116
1919		3 421 408
1920		25 261
1921		3 414 488
1922	} moyenne 38 500	3 680 377
1923		4 022 706
1924		4 182 216
1925		4 095 570
1926		4 250 277
1927	} moyenne 53 560	3 969 862
1928		3 714 603
1929		3 777 080
1930		3 670 914
1931	51 046	3 134 473
1932	47 279	3 010 582
1933	47 981	3 286 643
1934	48 658	3 305 421
1935	47 119	3 346 688
1936	46 171	3 241 543
1937	45 364	3 130 519
1938	47 562	3 274 103
1939	50 249	3 618 519
1940	40 984	4 156 212
1941	43 857	4 164 127
1942	43 827	4 031 314
1943	42 428	3 862 526
1944	26 577	3 152 851
1945	35 017	3 137 322
1946	49 290	4 002 328
1947	47 309	3 578 094
1948	45 136	3 273 765
1949	53 048	3 885 514

TABLEAU N° 1-3

Extraction nette de houille et lignite

<u>Année</u>	<u>FRANCE</u>	<u>Houillères de la Loire</u>
	(en milliers de t)	(en tonnes)
1950	52 529	3 624 057
1951	54 975	3 641 603
1952	57 355	3 840 405
1953	54 536	3 471 191
1954	56 315	3 330 879
1955	57 389	3 355 598
1956	57 381	3 433 081
1957	59 089	3 355 550
1958	60 039	3 531 534
1959	59 781	3 317 459
1960	58 236	3 010 149
1961	55 263	2 635 820
1962	55 241	2 392 688
1963	50 229	2 051 671
1964	55 277	2 223 356
1965	54 037	2 201 117
1966	52 902	2 108 489
1967	50 555	2 005 898
1968	45 132	1 760 196
1969	43 533	1 584 768
1970	40 139	1 563 897
1971	35 766	1 298 264
1972	32 725	1 015 305
1973	28 457	695 973
1974	25 655	553 724
1975	25 600	420 338
1976	25 068	540 580
1977	24 374	434 091
1978	22 422	221 416
1979	21 065	173 494
1980	20 720	239 722
1981	21 545	244 000

TABLERAU N°1-3 (suite)

### III - CONTEXTE GEOLOGIQUE

#### III-1 - Généralités

Le bassin houiller de Saint-Etienne, ou bassin de la Loire, s'étend de Firminy à Rive de Gier suivant une orientation N055° à N060° (P.Vetter 1971).

Vers l'est, au delà de Rive-de-Gier, il se prolonge par une série de petits lambeaux dont le jalonnement atteint 120 Km de long ; sous les terrains secondaires et tertiaires de la plaine de Lyon, des forages ont précisé l'existence d'un vaste bassin qui représente le prolongement du stéphanien de la Loire (stéphanien moyen ou supérieur selon les auteurs), dont il est séparé par le seuil de Givors (figure n°1-4).

Encaissé entre les monts du Lyonnais au nord (massif cristallin de Riverie), le massif du Pilat au sud et les granites des monts du Forez à l'ouest ; ce bassin se présente sous la forme générale d'un synclinal dissymétrique cisailé au sud par la faille du Pilat.

Au nord, le stéphanien repose normalement sur le socle cristallin.

La puissance totale du Stéphanien de la Loire est de l'ordre de 5000 m.

Dans l'ensemble le stéphanien de la Loire est constitué d'une sédimentation de type torrentiel comportant une majorité d'éléments grossiers essentiellement issus de massifs bordiers.

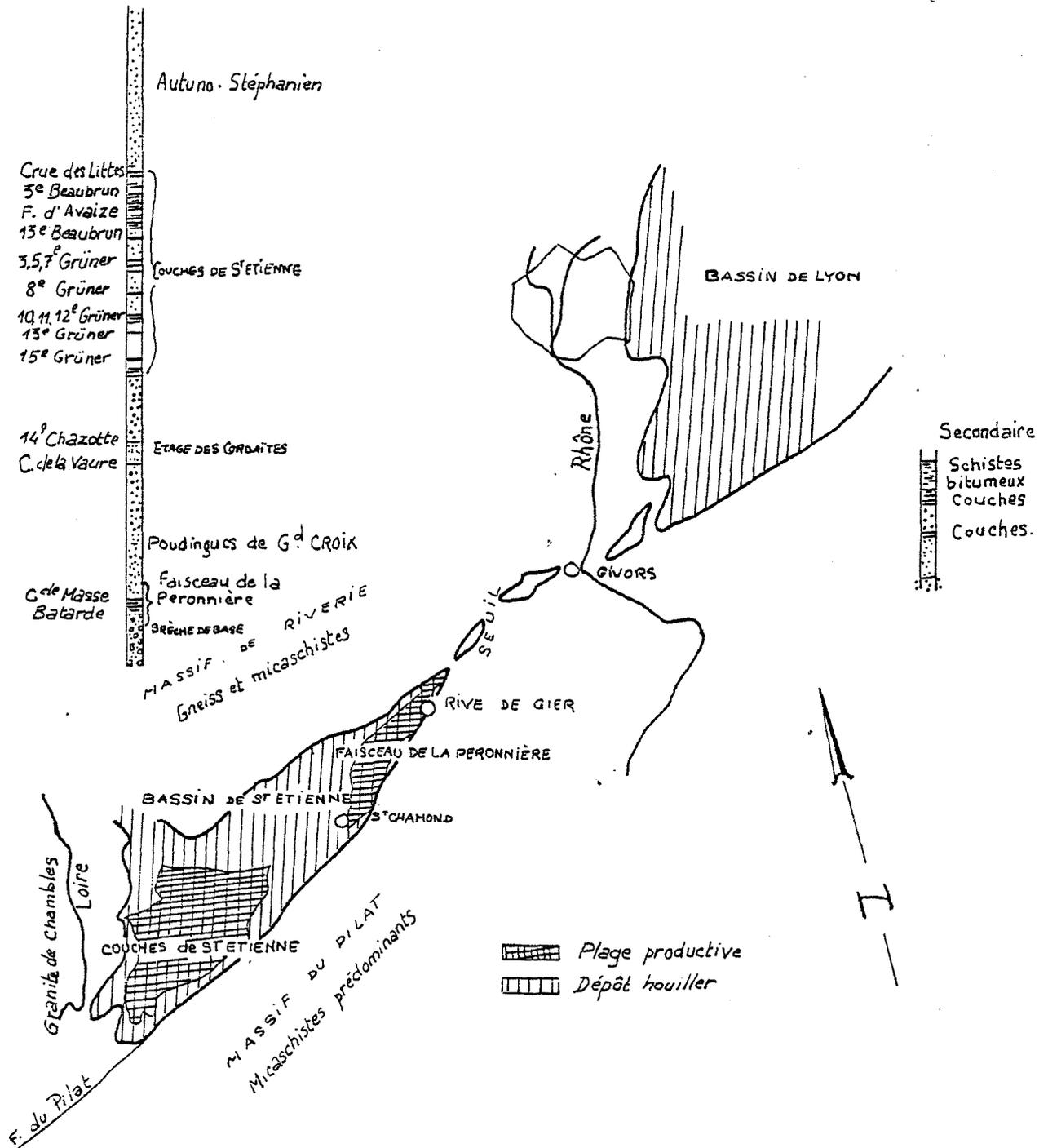
Deux zones se distinguent par la finesse relative de leurs sédiments (grès, schistes) et la présence de nombreuses couches de charbon ; ce sont les deux horizons productifs principaux :

- le faisceau de la Péronnière à l'est
- la série de couches de Saint-Etienne à l'ouest.

C'est dans la série des couches de Saint-Etienne que se situe le secteur concerné par cette étude.

FIGURE N° 1-4

DESCRIPTION GEOLOGIQUE DU BASSIN HOUILLER DE LA LOIRE  
(D'après J. DEMAISTRE)



### III-2 - Lithostratigraphie

Le bassin de la Loire a été étudié depuis de nombreuses années par différents auteurs (MM. Grüner, Coste, Grand-Eury), mais nous ne citerons ici que les travaux les plus récents de J. De Maistre (1963), A. Bouroz et J. Doubinger (1978) qui ont apporté des vues nouvelles sur la stratigraphie et la tectonique.

J. De Maistre a montré qu'il y a dans le bassin deux grandes unités stratigraphiques, l'une en place au nord-est, l'autre charriée au sud-est.

Le gisement en place du comble nord (nord-est du bassin) atteint une puissance de 2400 m et comprend deux grandes formations sur lesquelles nous ne nous approfondirons pas :

- l'assise de Rive-de-Gier (stéphanien A)
- la série de Sorbiers (stéphanien B)

Le gisement charrié (situé dans le secteur de notre étude) a une puissance de 2500 à 3000 mètres, et comprend deux séries :

- l'assise des couches de Saint-Etienne (1500 m)
- Une formation ambiguë autuno-stéphanienne (1500 m)

La série des couches de Saint-Etienne est laminée à sa partie inférieure par un charriage basal; elle repose sur un conglomérat sans doute autochtone.

On y distingue successivement de bas en haut, la série de Grüner comportant 16 couches de charbon (1° à 16° Grüner), le faisceau Beaubrun (2° à 13° Beaubrun) et le faisceau de Littes.

Le faisceau Beaubrun et le faisceau des Littes sont regroupés sous le nom de série d'Avaize.

Cette série des couches de Saint-Etienne est à rattacher tout entière, selon De Maistre, au stéphanien moyen ; les couches de charbon y sont nombreuses et peuvent atteindre de grandes épaisseurs.

La formation ambiguë autuno-stéphanienne se termine par un étage stérile de couronnement recouvrant la dernière assise productive du bassin : le faisceau de Bellevue comportant les couches Mouillées, Chauvetière, Mont 1 et 2.

Le conglomérat de base de toute cette série charriée (poudingue de Saint-Chamond) ainsi que l'étage stérile de couronnement (couverture du houiller productif) sont deux ensembles grossiers et stériles à faciès mixte quartzo-micacé (granite, gneiss, et micaschistes).

Dans la série des couches de Saint-Etienne les "stampes" sont riches en débris de granite et donc plutôt feldspathiques (comme l'avait déjà fait observer Grand-Eury, les belles couches de charbon sont toujours associées dans la Loire à des sédiments feldspathiques; le charbon tend à s'altérer quand l'apport micacé augmente et finit par disparaître complètement dans les roches franchement quartzo-micacées).

Les rapports entre le gisement charrié du comble-nord et le gisement charrié du comble sud, sont difficiles à définir.

J. De Maistre tendrait à mettre en corrélation les couches de la Chazotte (série de Sorbiers) avec la série de Grüner (fig n° 1-5) ; récemment A. Bouroz propose (fig. n°1-6) une équivalence entre ces mêmes couches de la Chazotte et le faisceau de Littes (assise d'Avaize, couches de Saint-Etienne).

### III-3 - Tectonique

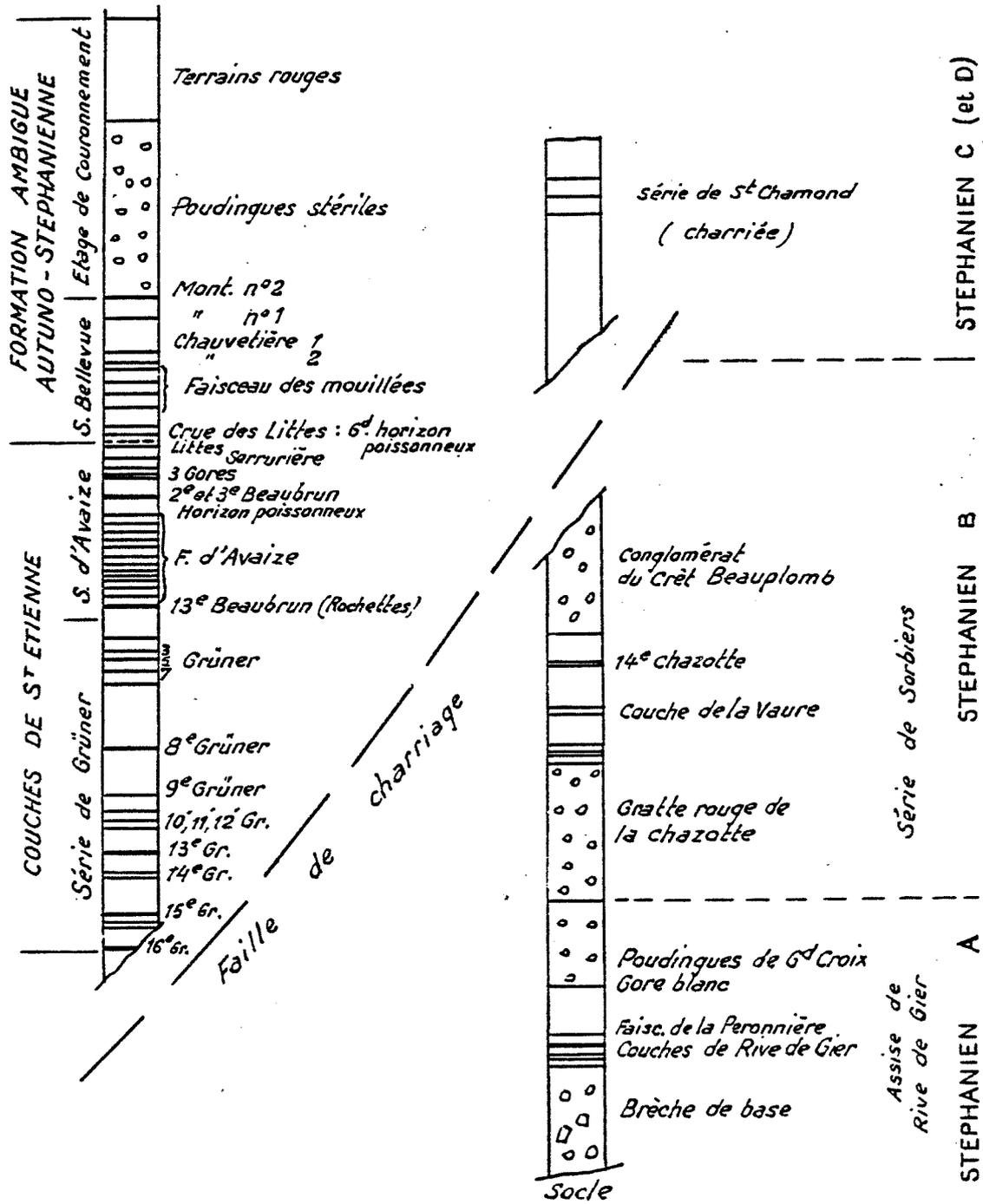
En 1963 J. De Maistre, ayant constaté que les couches de Saint-Etienne sont séparées des terrains sur lesquels elles reposent par un accident limitant le houiller productif en profondeur, concluait dans son étude tectonique du bassin qu'il y avait deux interprétations possibles et contradictoires pour expliquer la structure actuelle des terrains.

Dans cette étude, outre le charriage basal, il décrit le "comble sud" comme étant morcellé par de grandes failles longitudinales orientées ENE-WSW qui convergent lentement vers l'est, et des failles transversales beaucoup moins importantes qui ne coupent jamais les failles longitudinales (figure n°1-7) ; cette structure est interprétée comme une série d'écaillés parallèles dont l'origine peut trouver les deux interprétations suivantes :

- elles pourraient être le résultat d'un charriage qui aurait rapproché deux ensembles primitivement plus éloignés (comble nord et comble sud), et s'étant peut-être même formés dans deux cuvettes différentes plus ou moins indépendantes l'une de l'autre.

FIGURE N° 1-5

Le Carbonifère supérieur et le Permien du Massif Central (REVETTER)



Échelle stratigraphique du Stephanien du bassin de la Loire d'après J. de Maistre (1963) légèrement modifiée.

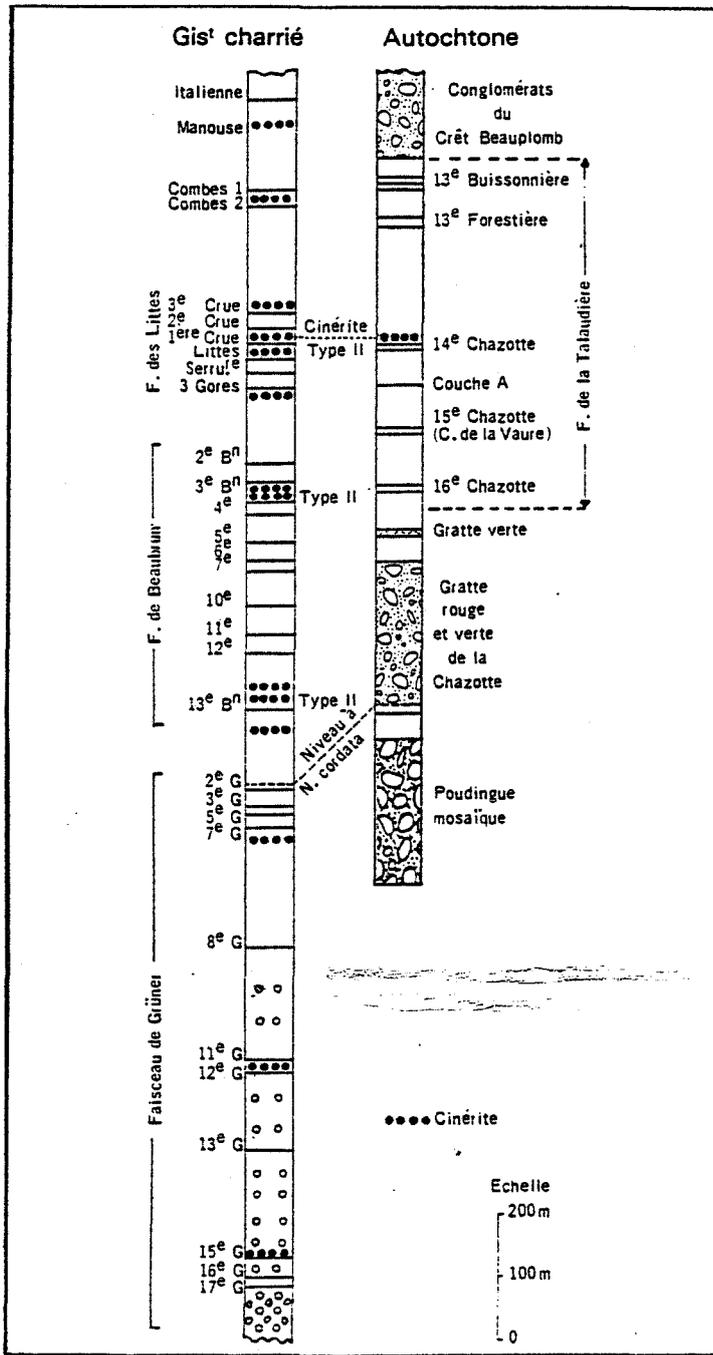


FIGURE N° 1-6

POSITION STRATIGRAPHIQUE DU FAISCEAU DE LA TALAUDIÈRE  
ET DU POUDINGUE MOSAÏQUE DANS LE CARBONIFÈRE DE  
SAINT-ÉTIENNE (A. BOUROZ - J. DOUBINGER)

- ou bien, l'ensemble de Saint-Etienne (comble sud) primitivement situé à l'est, se serait "écoulé" vers l'ouest ou le nord ouest jusque dans la région où on le trouve actuellement (J. De Maistre ne définit pas l'origine de cet "écoulement").

Après la mise en place de ces lambeaux charriés (quel que soit le mécanisme envisagé), J. De Maistre décrit deux phases tectoniques; l'une caractérisée par un étirement est-ouest résultant d'une "poussée oblique venant du bord sud" liée à un "déplacement du massif du Pilat qui, situé primitivement plus à l'est a cheminé vers l'ouest en comprimant tout le gisement placé au toit de la faille du Pilat"; les accidents résultant de cette phase affectent aussi bien le socle que le houiller et tronquent à la base certaines unités charriées.

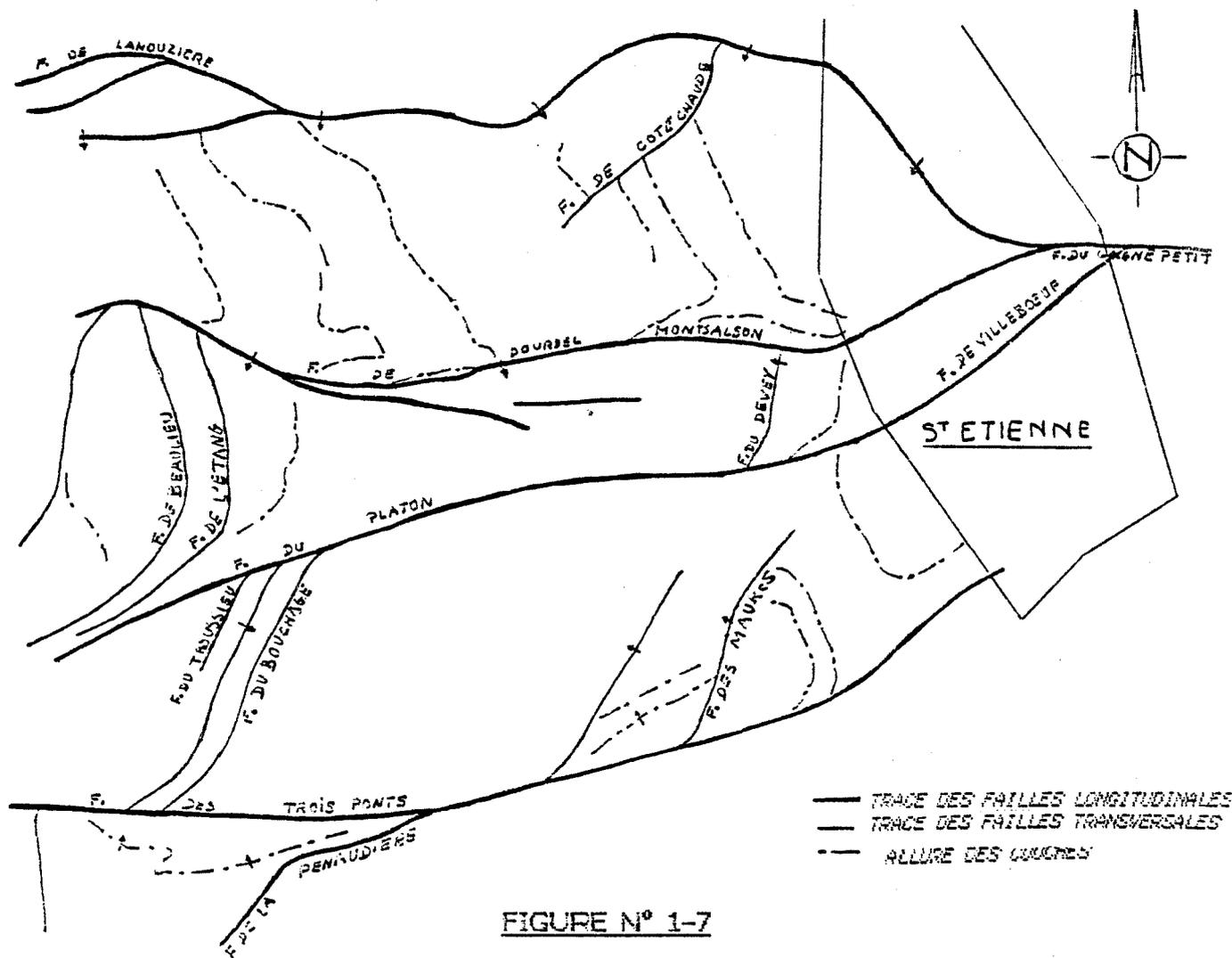


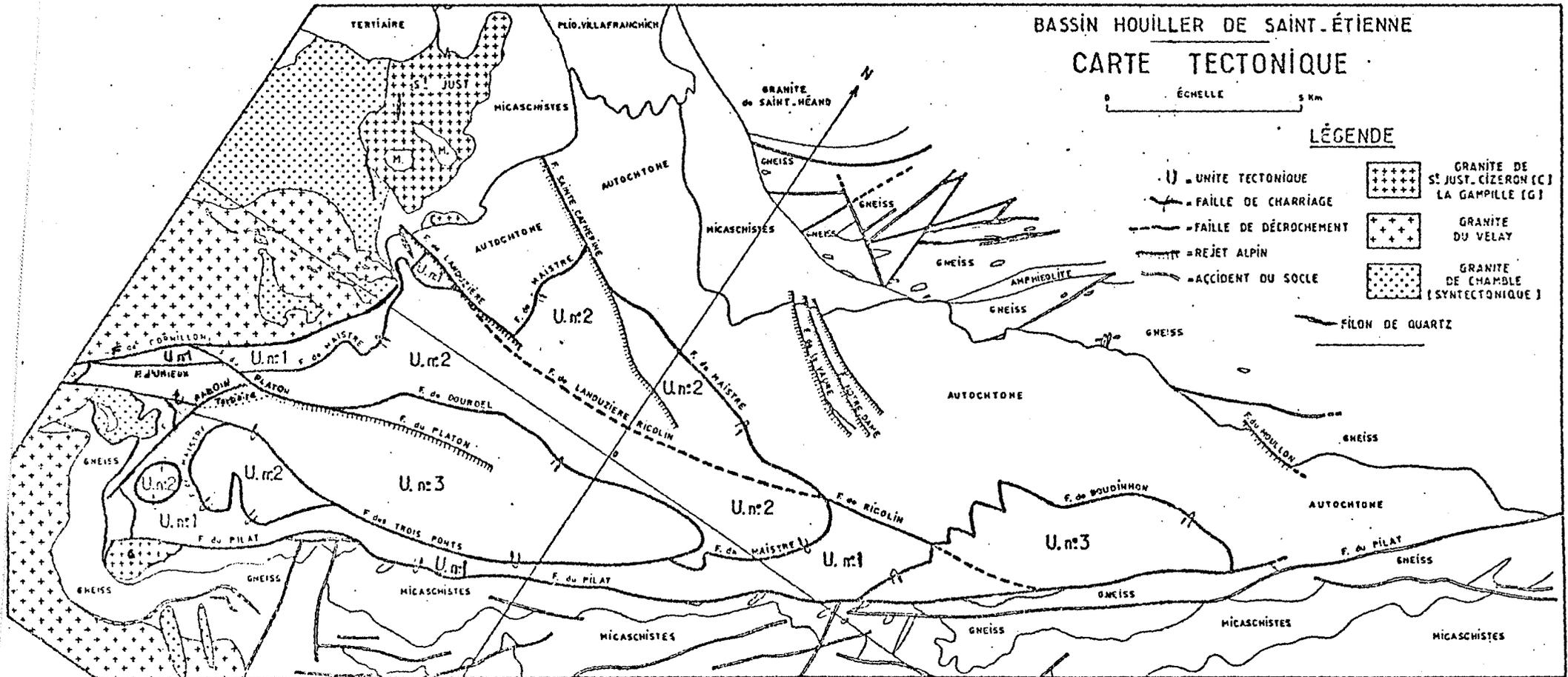
FIGURE N° 1-7

LE COMBLE SUD (D'après J. DEMAISTRE)

FIGURE N° 1-8

CARTE TECTONIQUE DU BASSIN HOILLER DE SAINT-ETIENNE

(D'après A. BOUROZ)



Cette phase aurait été suivie d'une dernière période de décompression et de tassement dont l'existence, quoique vraisemblable pour J. De Maistre n'est pas démontrée.

En 1978, A. BOUROZ reprend l'étude tectonique du bassin de la Loire en tenant compte de travaux récents sur le style tectonique régional du socle qui permet d'arriver à une hypothèse cohérente, articulant les deux séries de déformations mises en évidence par J. De Maistre (charriages de grande amplitude et existence de troncatures à la base de certaines unités charriées).

A. Bouroz distingue dans le bassin deux séries autochtones et trois unités charriées qu'il agence de la façon suivante (figure n° 1-8) :

- L'autochtone n°1, sur lequel repose l'autochtone n°2 transgressif est limité au sud par la faille de Landuzière-Ricolin qui produit un décrochement important dans le socle cristallin (compartiment sud surélevé).

- L'unité n°1 charriée sur le socle cristallin par l'intermédiaire de la faille de charriage basal affleure à l'est au sud et à l'ouest des unités productives charriées. Mais, elle est limitée au nord par la même faille de Landuzière -Ricolin qui la met en contact avec l'autochtone.

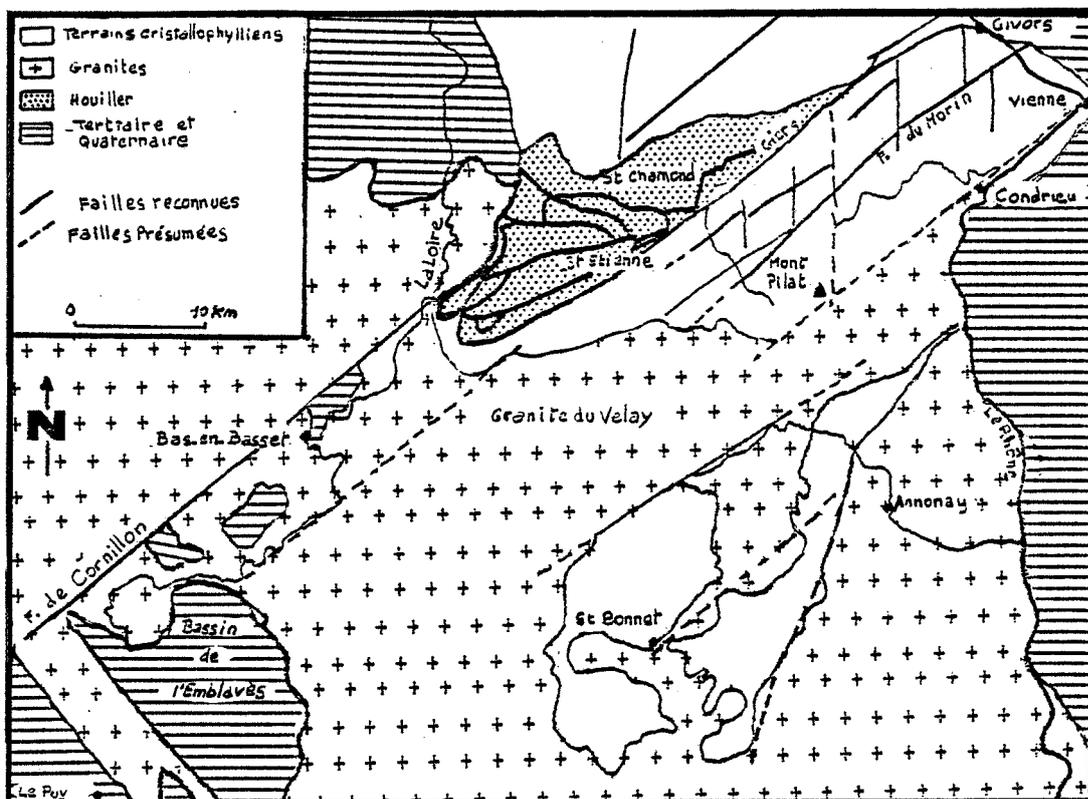
Cette unité est composée de formations grossières connues également dans l'autochtone n°2.

- L'unité n°2 est charriée à la fois sur l'unité n°1 et l'autochtone (au nord) par l'intermédiaire de la faille De Maistre.

- L'unité n°3 repose sur les terrains précédents par l'intermédiaire de la faille des trois ponts.

Cet ensemble est morcellé par plusieurs accidents importants, affectant aussi bien les terrains houillers que le socle et même, pour la faille de Platon, des terrains tertiaires.

Pour interpréter cette structure A. Bouroz replace le bassin dans le cadre tectonique régional des cevennes septentrionales (fig n° 1-9) affectées, dans les régions entourant le bassin houiller, d'un ensemble d'accidents cassants subverticaux formant deux systèmes d'importance inégale.



### ACCIDENTS CASSANTS DANS L'ANTE HOULLIER

FIGURE N° 1-9

DES CEVENNES SEPTENTRIONALES

(CHENEVOY & RAVIER 1963)

Un ensemble de grands accidents orientés  $N050^\circ$  à  $N080^\circ$ , accompagné de fractures  $N000^\circ$  à  $N010^\circ$  qui peuvent décrocher les grands accidents ou bien s'arrêter sur eux.

Ce double système est interprété comme un "tectonique de blocs" que l'on ne retrouve pas de manière évidente dans le bassin houiller.

Pour expliquer cette différence, A. Bouroz résume l'histoire du bassin de la façon suivante:

- Dans le pays métamorphique antécarbonifère apparaît au post-dévonien terminal, une rétro-morphose suivie d'un métamorphisme basse pression puis de la montée du granite du Velay contemporaine d'une phase de plissements d'axe NNE. Cette montée du granite du Velay est compensée à l'est par l'apparition d'une zone de subsidence dans laquelle débute la sédimentation du houiller.

- Le relief de bordure du bassin est ensuite rajeuni provoquant une érosion partielle du stéphanien inférieur et la transgression du stéphanien B.

Le granite de Chamble apparaît alors à l'affleurement, il compense la poursuite de la subsidence à l'est pendant le dépôt des stéphanien

B, C et D .

- A la fin du stéphanien ou au début de l'autunien, il y a arrêté de la subsidence et même inversion du mouvement à l'est du bassin. Ce mouvement de surrection du socle entraîne la mobilisation passive de sa couverture carbonifère vers l'ouest-sud-ouest (phase saalienne, permien), aboutissant à la formation des trois unités charriées.

Après mise en place de ces unités, la phase saalienne s'achève par une contrainte d'axe ouest-nord-ouest entraînant des déformations souples et cassantes dans le bassin (resserrement en auge de l'unité n°3, écrasement de l'unité n°2 sous la faille de Dourdel etc ...).

L'orogénèse alpine se manifeste ensuite par le réveil de fractures subverticales normales à pendage sud-ouest (failles de Cornillon, du Platon, de Sainte-Catherine etc...), qui affectent le socle, le houiller et les terrains tertiaires susjacentes.

A. Bouroz reprend donc ainsi l'hypothèse de J. De Maistre relative à la mise en place des unités charriées par "écoulement" gravitaire depuis l'est du bassin (figure n° 1-10), il ajoute à ce travail une interprétation supplémentaire concernant le rejeu de failles affectant le socle, le carbonifère et le tertiaire, qu'il accorde à l'orogénèse alpine.

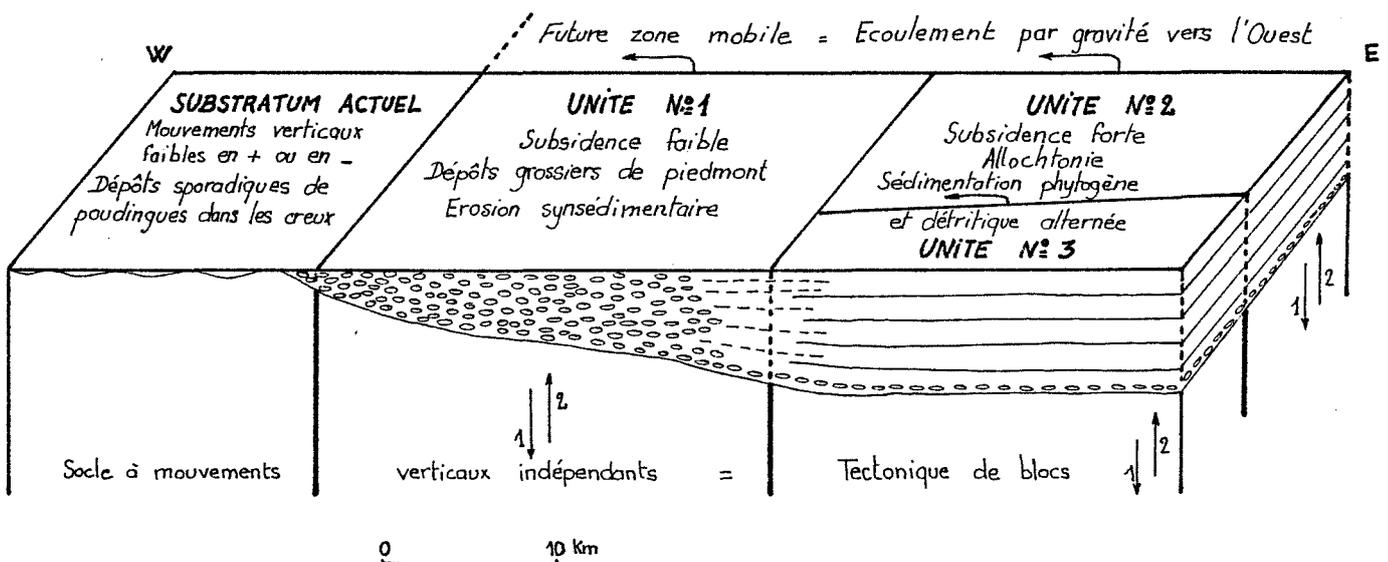


FIGURE N° 1-10

MISE EN PLACE DES UNITES CHARRIEES

(D'après A. BOUROZ)

#### IV - Influence de l'exploitation minière sur les terrains environnants.

##### IV-1 - Introduction

L'exploitation souterraine d'un minerai peut se faire suivant différentes méthodes en fonction du type de gisement, cependant, chacune de ces méthodes s'accompagne de la création de vides dans le terrain.

De plus, ces perturbations s'accompagnent en surface de mouvements dépendant de différents facteurs que nous tenterons de définir dans ce chapitre.

La prise en compte de ces phénomènes est nécessaire pour mettre en évidence l'influence de l'exploitation minière au niveau hydrogéologique et déterminer les modifications apportées aux caractéristiques naturelles des terrains (transmissivité et coefficient d'emménagement).

##### IV-2 - Effets des travaux souterrains en profondeur.

###### IV-2-1 - Galeries

Les mesures effectuées dans des galeries montrent qu'il se forme autour des travaux souterrains une zone de détente des roches liée à une décompression des terrains.

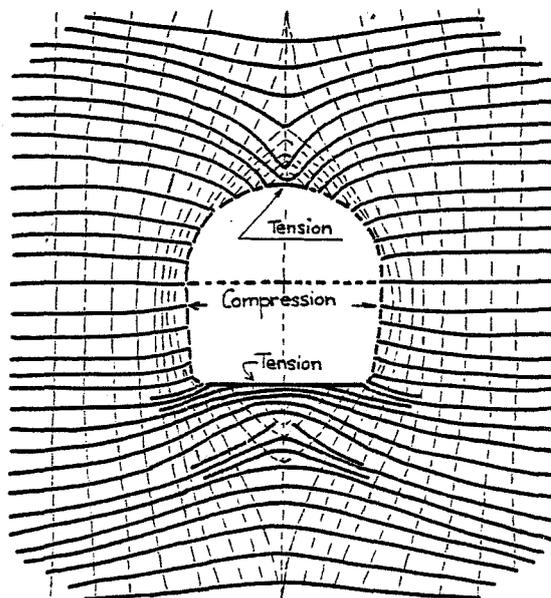


FIGURE N° 1-11

Entre cette zone et la limite où les terrains cessent d'être influencés, ceux-ci sont au contraire en surpression (figures n° 1-11).

La mesure des contraintes permet de définir la limite d'influence au delà de laquelle les terrains sont à la pression lithostatique normale (figure n° 1-12), et d'en déduire la forme de galerie la plus résistante (il s'agit d'une ellipse dont le grand axe serait horizontal pour de faibles profondeurs et vertical à plus grande profondeur (V. Vidal 1961)).

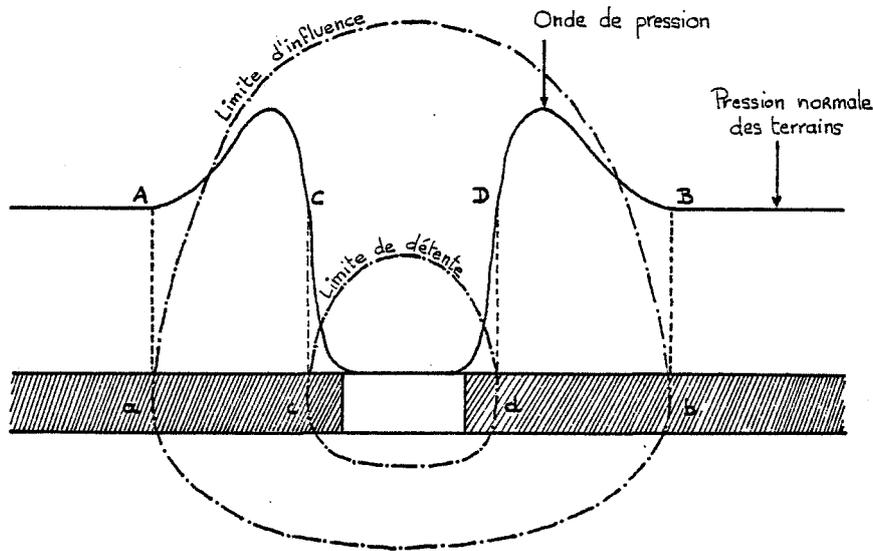


FIGURE N° 1-12

#### LIMITE D'INFLUENCE DU CREUSEMENT D'UNE GALERIE

A l'intérieur de la zone de décompression entourant l'ouvrage, les terrains sont plus ou moins fissurés et les couches successives présentent entre elles un certain vide.

Des mesures effectuées dans la zone de surpression ont montré que les fortes contraintes sont d'autant plus réparties que le toit de la galerie est constitué d'un matériau d'autant plus rigide (grès plutôt que schiste).

Le poids des terrains surplombant l'exploitation est à l'origine des pressions résidant dans la mine (compte tenu du fait que la densité moyenne des terrains houillers est de 2,5), les contraintes mesurées à 1000 mètres de profondeur sont donc de l'ordre de  $2500T/m^2$ .

Au cours de leur existence, les galeries subissant ce type de

contraintes dans des terrains dont le comportement général est celui d'un corps semi-plastique, font l'objet de déformations liées au fluage du charbon, se caractérisant par un abaissement du toit et une surrection du mur.

Ces déformations sont étudiées par de nombreux auteurs car elles nécessitent un entretien permanent de la galerie impliquant des heures de travail onéreuses.

Les différents facteurs d'influence de ces phénomènes de fluage sont bien sûr la profondeur de la galerie à laquelle est directement liée la pression statique.

Mais aussi le type de roche constituant le toit et le mur de la galerie ainsi que la solidité de cette roche réglant son comportement mécanique.

Dans les mines de la région par exemple, une galerie creusée dans la concession de Montrambert (-960 mètres de la surface) peut-être entièrement obturée par fluage du mur en moins de trois ans, si elle n'est pas entretenue.

#### IV-2-2 - Tailles

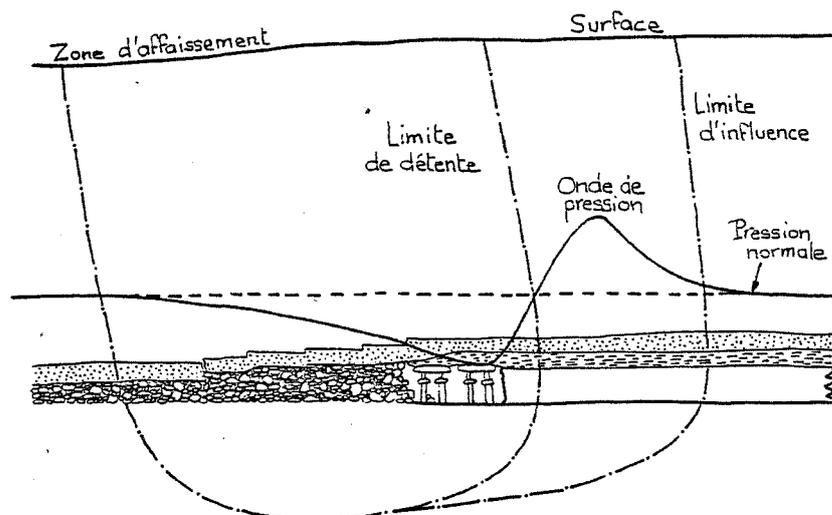


FIGURE N° 1-13

INFLUENCE D'UN FRONT DE TAILLE

L'étude du comportement des terrains lors de l'avancement d'une taille montre des phénomènes de même type que ceux rencontrés autour d'une galerie, cependant ils se déplacent avec le front de taille.

On observe, au niveau de la taille une zone de décompression liée, dans la zone frontale à une onde de pression qui se déplace avec les travaux (figure n° 1-13).

L'onde de pression frontale crée une fissuration préalable provoquant le déplacement du charbon vers la taille, ce qui en facilite l'exploitation (on dit que la couche "travaille").

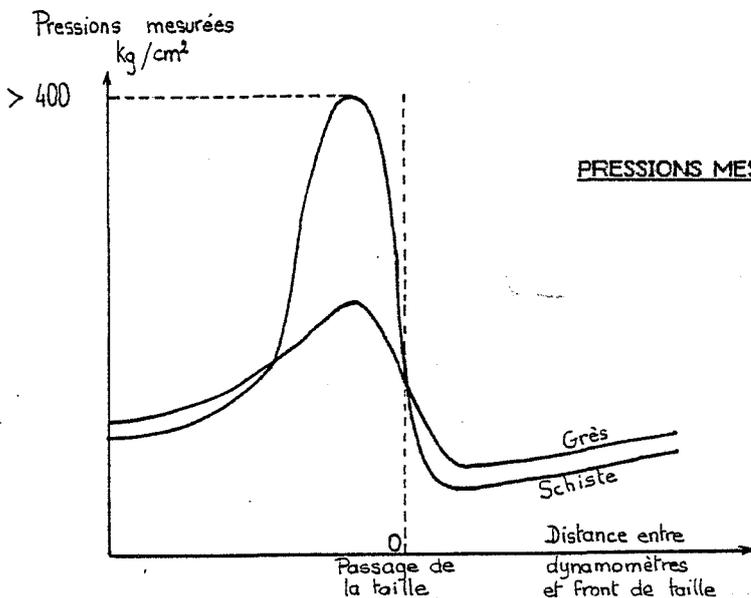
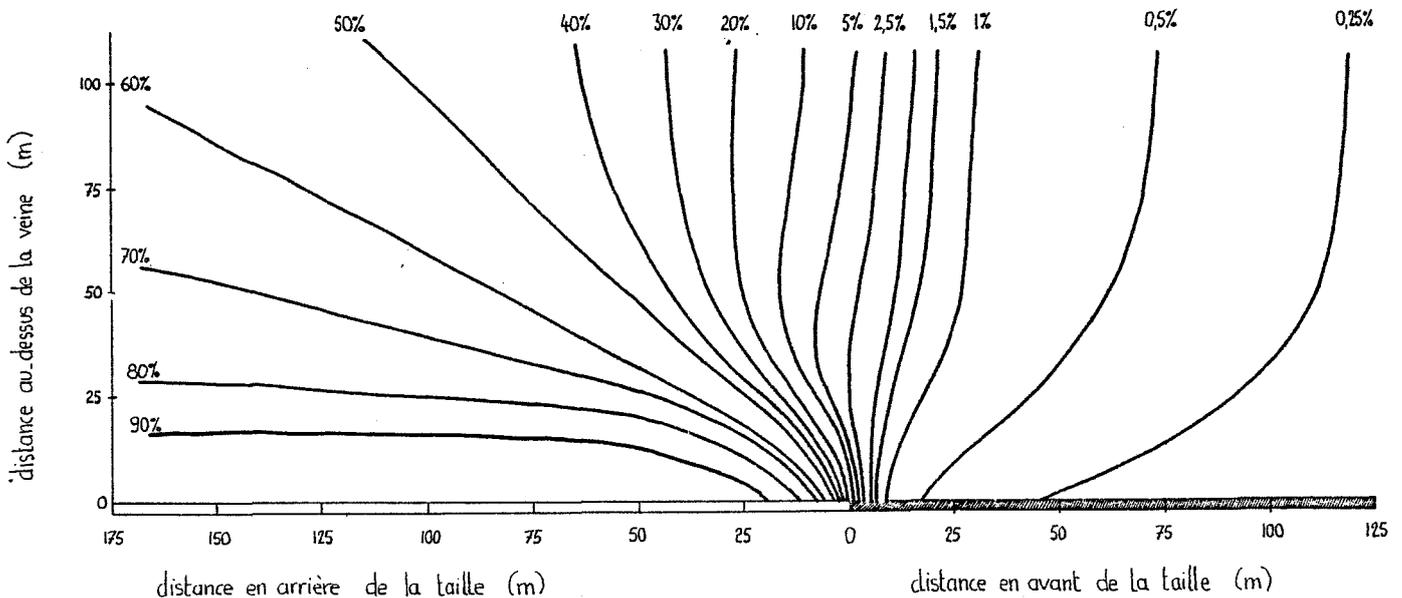


FIGURE N° 1-14

PRESSIONS MESUREES AU PASSAGE D'UN FRONT DE TAILLE

FIGURE N° 1-15

DEPLACEMENT DES TERRAINS EN % DE LA PUISSANCE DE LA COUCHE



Des mesures effectuées à l'aide de dynamomètres placés dans des

forages au dessus des travaux montrent que cette onde présente des caractéristiques différentes en fonction des terrains susjacents (figure n°1-14).

A l'arrière de la taille, quand celle-ci se déplace, le remblai ou les terrains foudroyés ne supportent d'abord que de faibles pressions.

Ce n'est que peu à peu, au fur et à mesure que la zone remblayée s'étend, ou que le foudroyage (remblayage des vides par les terrains susjacents) atteint les bancs supérieurs du toit, que l'arrière taille supporte à nouveau une certaine pression.

Cette dernière va en augmentant lorsque la taille s'éloigne. Les mouvements verticaux qu'accusent les terrains susjacents sont alors de plus en plus importants (figure n° 1-15) (Edwards L.J.Potts 1964).

Au cours de l'exploitation apparait au toit des travaux une fissuration engendrée par l'abatage et qui se développe parallèlement au front de taille.

Cette fissuration présente selon la classification de Jacobi (Spruth 1961) quatre types de cassures :

- I : des cassures parallèles à la stratification
- II : des cassures verticales ou "induced clivage"
- III : des cassures obliques vers l'avant de la taille ("min breaks")
- IV : des cassures obliques vers l'arrière de la taille

C'est le long des cassures du groupe III que glisse en général le rocher en arrière taille (figure n°1-16).

Les cassures du groupe IV ont le plus souvent une pente plus faible que celles du groupe III ; elles sont moins importantes et s'arrêtent en principe sur celles-ci.

s'applique à modéliser la mécanique des terrains liée à ces divers facteurs d'influence.

Le type de contrôle des vides de l'arrière taille est aussi un facteur important qui influe sur le comportement des terrains de façon différente en fonction de la technique utilisée.

Si les épontes sont rigides, l'exploitation se fait par chambres et piliers que l'on abandonne ensuite sans qu'il y ait nécessité de remblayer; cette méthode utilisée dans le passé dans les mines de charbon de la Loire n'y a plus cours actuellement pour différentes raisons : il y a risque d'inflammation spontanée des terrains, le pourcentage de minerai exploité est faible, le risque de coup de charge est important si le terrain n'est pas assez rigide.

Plus récemment, les procédés utilisés permettent une meilleure récupération du minerai et assurent une plus grande sécurité (P. Stassen 1978) ; ils consistent soit à remblayer par diverses méthodes les vides créés par la taille, soit à diriger le foudroyage des terrains (autorembayage).

Le remblayage consiste à remplacer le minerai abattu par des matériaux divers. On prévoit le volume de remblai nécessaire en tenant compte de la convergence naturelle des terrains (10 à 25 %) et éventuellement du volume de bois abandonné (2 à 5 %). Le remblai doit, en outre suivre de très près le front de taille.

La mise en place du remblai peut être manuelle, mais cette méthode coûte cher, elle est fatigante pour les mineurs, peut être cause de feu et s'accompagne en général de dégâts de surface importants.

Le remblayage mécanique se fait soit par projection, soit par scraper soit, et c'est le cas le plus courant, on effectue un remblayage pneumatique (projection par air comprimé de matériaux concassés) ou un remblayage hydraulique.

Le remblayage hydraulique consiste à transporter le matériau en mélange avec de l'eau dans des tuyauteries provenant de la surface ; la granulométrie doit comprendre au moins 60 % de grains de diamètre inférieur à 6 mm et au plus quelques % compris entre 40 et 60 mm.

Le foudroyage ou autorembayage consiste à utiliser comme remblai les matériaux prélevés au toit de la taille (ce qui évite un transport

onéreux depuis la surface). Les éléments de soutènement sont retirés, et le toit s'éboule derrière l'atelier de travail.

Remblayage pneumatique, remblayage hydraulique et foudroyage sont les trois méthodes les plus couramment utilisées à l'heure actuelle.

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients que nous n'allons pas énumérer, concernant les problèmes de grisou, de feu, les problèmes techniques et financiers.

Quant à l'affaissement, le tableau suivant donne un ordre de grandeur des affaissements verticaux rencontrés en surface, en pourcentage de l'épaisseur de la couche exploitée :

- Foudroyage : 90 %
- Remblayage à main : 60 %
- Remblayage pneumatique : 40 à 50 %
- Remblayage hydraulique : 10 à 25 %

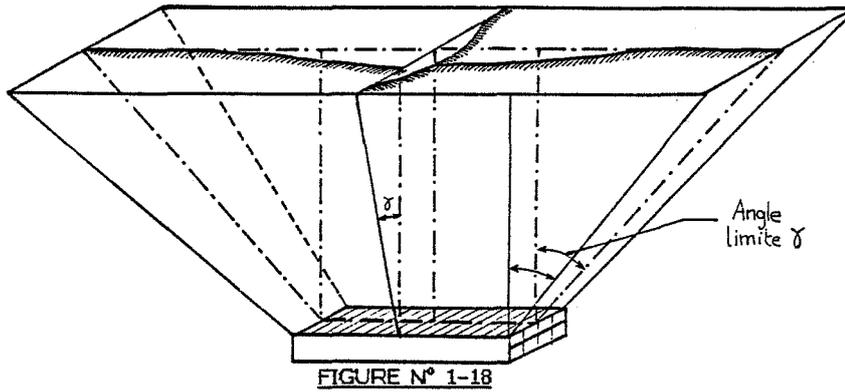
Force est donc de constater que, quelle que soit la technique employée, les perturbations créées en profondeur par l'exploitation se propagent jusqu'à la surface avec plus ou moins d'amplitude.

#### IV-3 - Influence de l'exploitation souterraine en surface

##### IV-3-1 - Affaissements

Depuis de nombreuses années, des observations et des mesures faites en surface ont permis de déterminer des lois précises pour prévoir les effets de l'exploitation et les dégâts de surface.

La règle la plus couramment admise est celle de l'angle limite défini comme étant l'angle formé dans un plan perpendiculaire à la limite des travaux par la verticale élevée en un point et la ligne qui joint ce point à celui de la surface où le mouvement devient négligeable (figure n° 1-18).

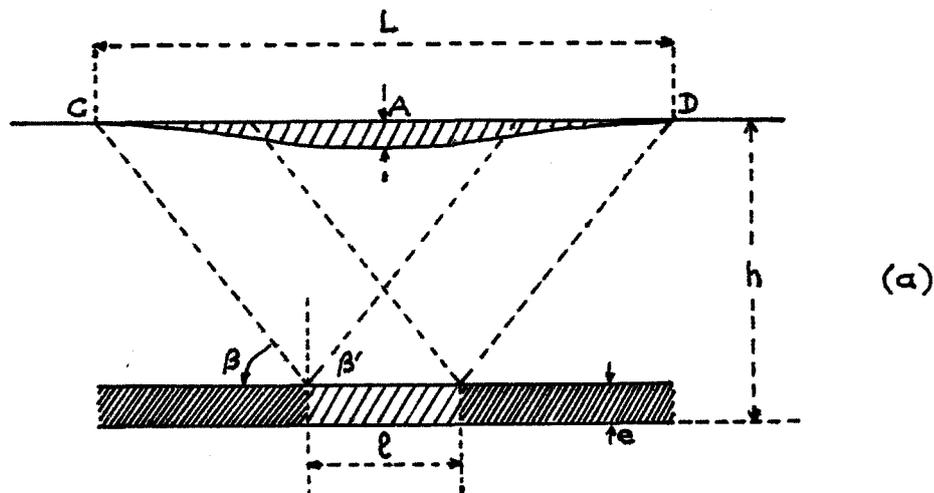


ZONE D'INFLUENCE D'UN COUCHE EXPLOITEE

Cet angle limite présente des variations suivant les bassins, la pente des travaux, la nature des terrains, etc... Cependant sa valeur est souvent de l'ordre de  $55^\circ$ .

A partir de cet angle apparait la notion d'aire critique qui, pour une profondeur d'exploitation donnée, est la surface qu'il est nécessaire de déhouiller pour qu'un point et un seul situé à la surface subisse l'affaissement maximum  $A_m$ .

Soit en coupe un front de largeur  $l$ , le toit s'effondrant derrière ce front provoque en surface une cuvette d'affaissement de largeur  $L$  (Figure n° 1-19).



L'affaissement  $A$  est maximum au centre de la cuvette ; le volume de la cuvette étant au plus égal à celui de la couche déhouillée.

La valeur  $A_m$  se détermine de la façon suivante :

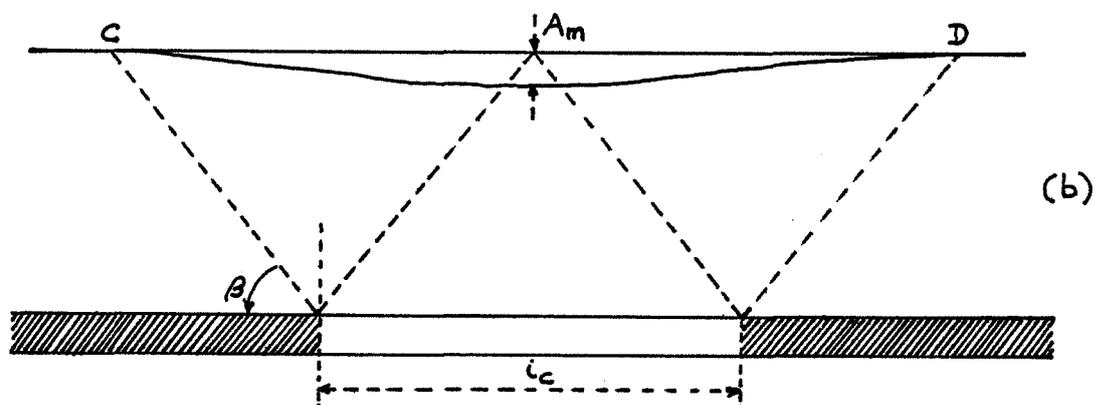
$$A_m = e \times f_1 \times f_2$$

$e$  = épaisseur de la couche

$f_1$  = facteur d'affaissement lié au type de remblayage (25 % à 90 %)

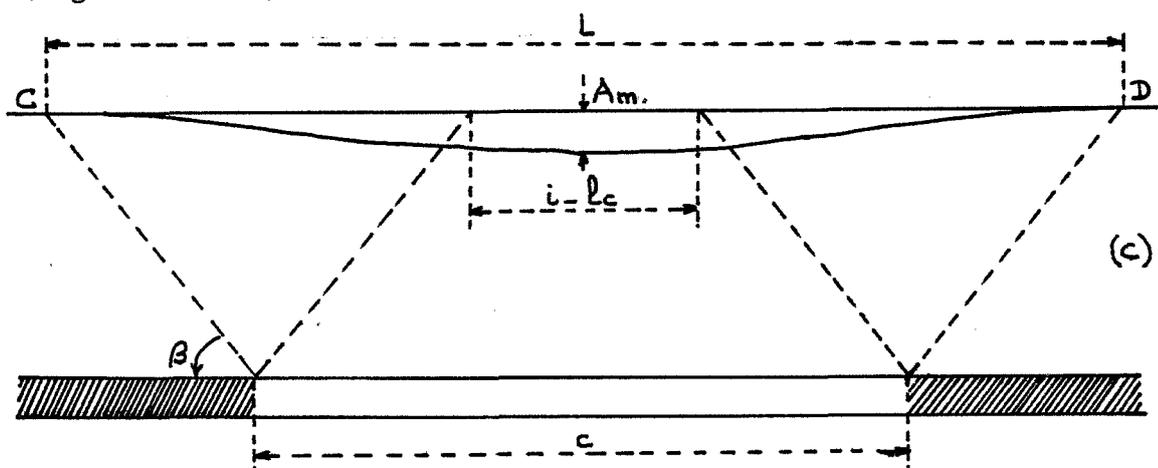
$f_2$  = facteur de profondeur : le volume des terrains mis en mouvement s'accroissant avec la profondeur, il est vraisemblable que l'affaissement (toutes conditions égales par ailleurs) diminue lorsque la profondeur augmente (Proust 1964). Il est difficile de déterminer le facteur  $f_2$  qui est en général pris égal à 1 jusqu'à 500 m et décroît légèrement ensuite.

La largeur critique est atteinte quand un point et un seul au centre de la cuvette atteint l'affaissement maximum (figure n° 1-20).



Au-delà, la zone où l'on a  $A = A_m$  s'étend sur une largeur  $L - l_c$

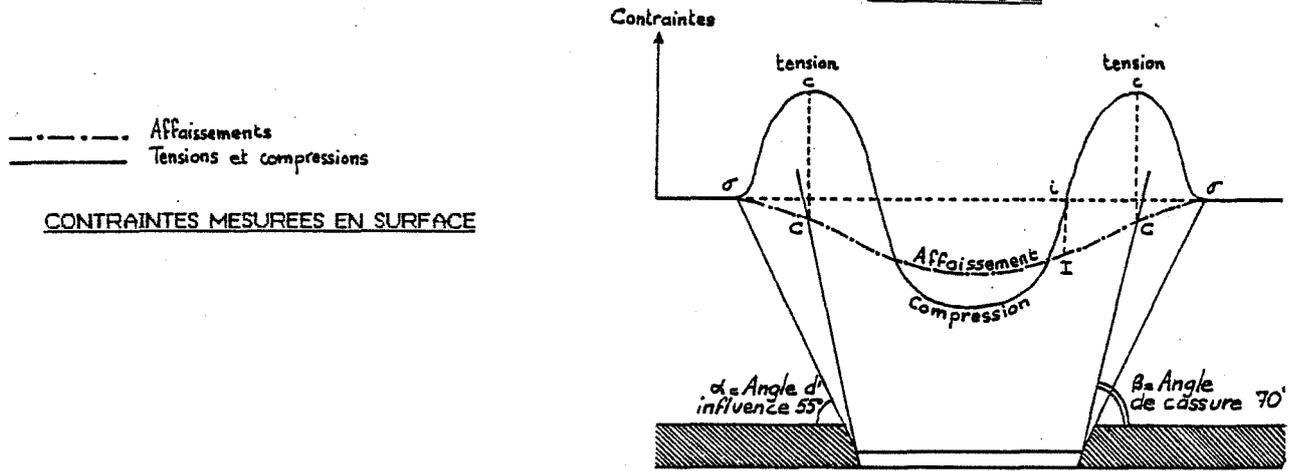
(figure n° 1-21) :



J. ARCAMONE (1979) fait remarquer l'influence d'une faille sur la forme de la cuvette d'affaissement.

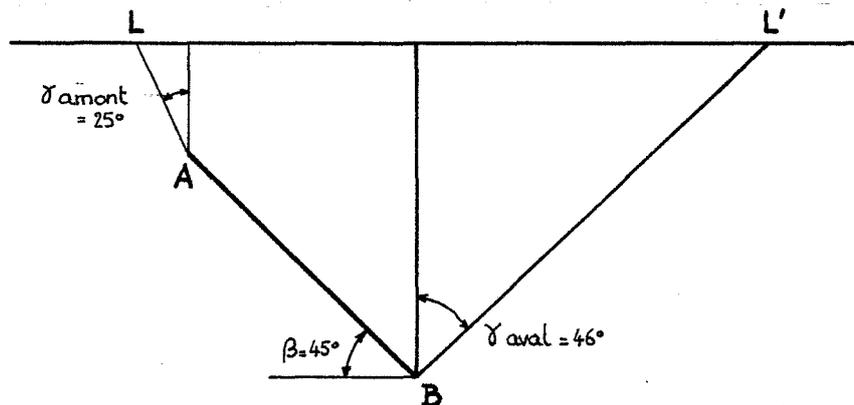
A l'intérieur de la surface d'influence, on peut observer à la surface deux lignes de cassures correspondant à la zone de contrainte maximale, liée en profondeur à la dépression créée par l'exploitation (figure n° 1-22).

FIGURE N° 1-22



On admet en général que ces lignes de cassure font avec l'horizontale un angle de 70°.

Si l'exploitation présente un pendage, il faudra définir un angle d'influence amont, et un angle d'influence aval de valeur différente (figure n° 1-23) :



L'affaissement total provoqué en un point quelconque de la zone d'influence est donné par la formule :

$$A_t = A_m \times i$$

Le facteur d'influence  $i$  qui fait intervenir la position relative du point  $T$  et de l'exploitation se détermine par une grille d'affaissement (figure n° 1-24) :

Dans le bassin houiller de la Loire, la méthode employée diffère de celle décrite ci-dessus, elle est dite "règle de la tangente complétée" : l'angle d'influence est partout défini comme étant de 50° ; seules les lignes de cassure varient avec la pente de la couche.

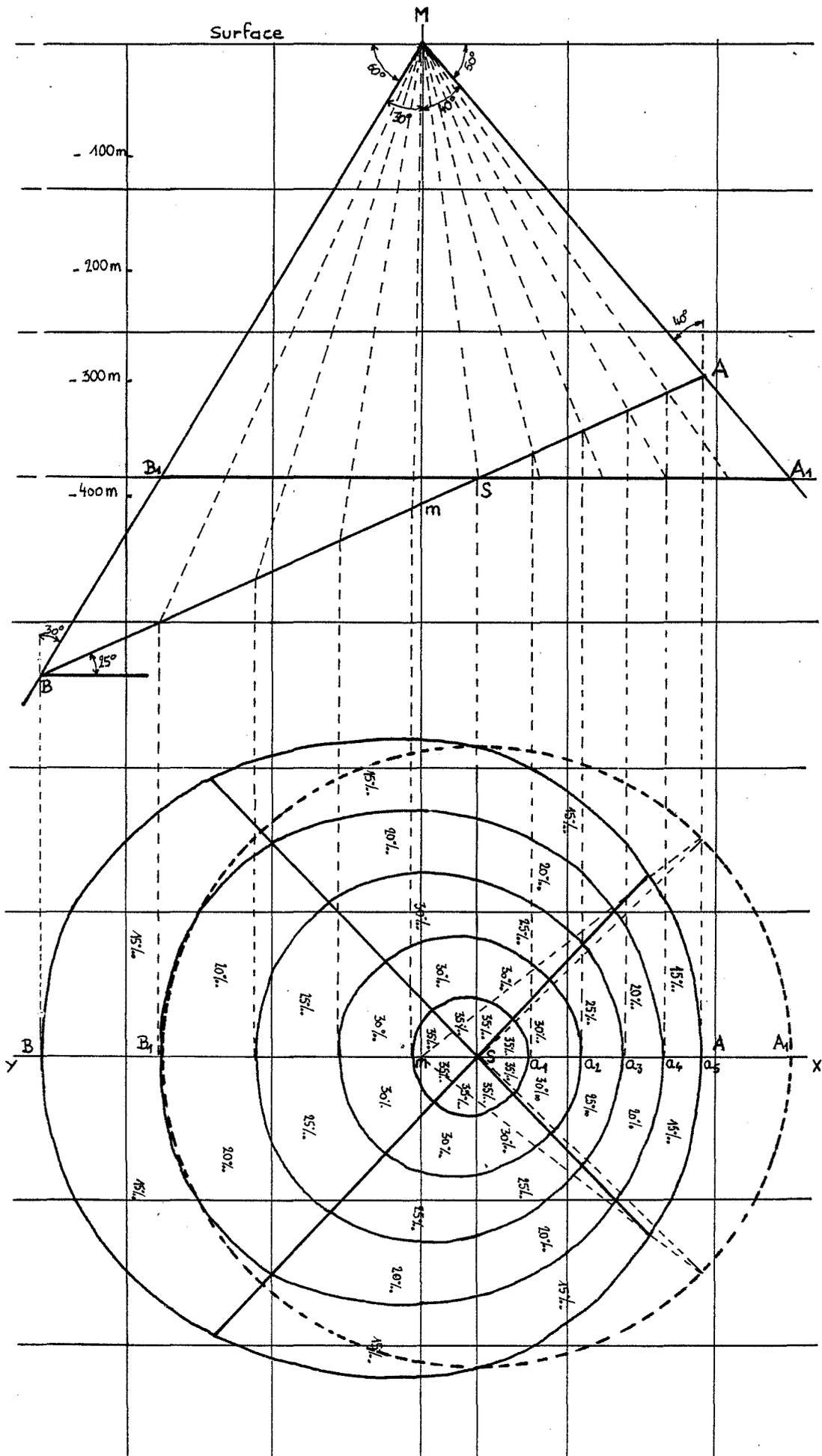


FIGURE N° 1-24

ABAQUE D'INFLUENCE D'UNE COUCHE EXPLOITEE  
PRESENTANT UN PENDAGE

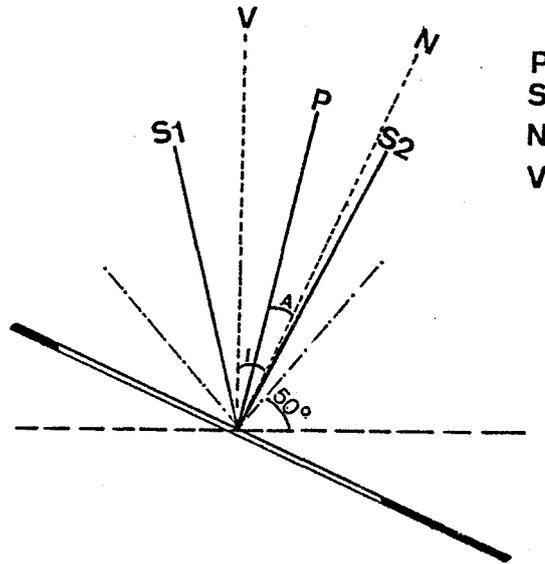
Toute couche exploitée provoque dans les terrains susjaccents deux sortes de fractures définies de la façon suivante :

- Cassure principale : pour une couche d'inclinaison  $i$  donnée, la ligne de cassure principale correspond à une droite dont l'angle  $A$  avec la normale à la couche répond à la condition suivante :

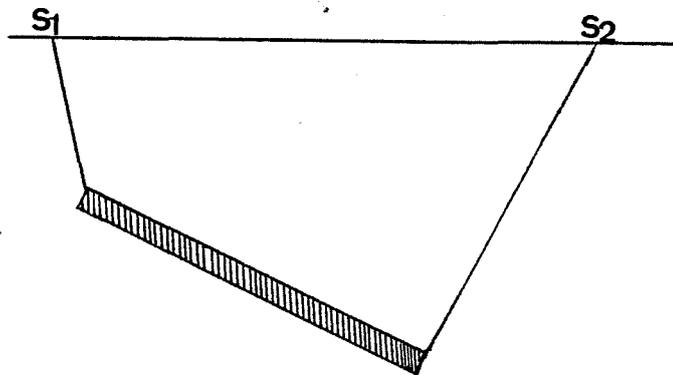
$$\operatorname{tg} A = 1/2 \operatorname{tg} i \text{ (figure n° 1-25)}$$

- Cassure secondaire : elle correspond à la bissectrice de l'angle formé par la ligne de cassure principale précédemment définie, et les lignes correspondant à l'angle limite d'influence ( $50^\circ$  avec l'horizontale) (figure n° 1-25).

FIGURE N° 1-25  
REGLE DE LA TANGENTE COMPLETEE



La zone dangereuse en surface est celle comprise entre les deux fractures secondaires (figure n° 1-26).



#### IV-3-2 - Autres perturbations dues à la mine

En surface, outre l'apparition d'affaissements, l'exploitation d'une mine se caractérise par des dépôts en terrils de matériaux issus de la mine.

Ces terrils modifient la topographie locale. Ils sont des zones de surchauffement par oxydation naturelle des matières carbonées. Ils provoquent également des contraintes importantes entraînant parfois un tassement local des terrains. Ils influencent aussi le comportement hydrogéologique local en retenant l'eau de pluie (Ph. Davoine 1983) d'une part, et en colmatant par leurs matériaux les plus fins les terrains environnants.

La nécessité, notamment pour l'exploitation du charbon, d'infrastructures de grandes dimensions (bâtiments importants, zones de stockage du minerai, plâtre de puits, etc...) s'accompagne souvent de l'aplanissement ou du remblayage de secteurs qui peuvent être étendus.

En cas de remblayage, on observe en surface la présence de "couches géologiques" artificielles qui modifient le comportement hydrogéologique du sous-sol (création localement de nappes aquifères superficielles) ainsi que la morphologie et le comportement hydrologique de surface (remblayage d'un vallon ---- écoulement localement modifié par exemple).

Les exploitations du charbon à l'affleurement ("découvertes" sont aussi des zones de remblayage importantes qui peuvent atteindre de grandes épaisseurs. Même si la topographie d'origine des terrains est bien reconstituée après remblayage, le comportement hydrogéologique local n'en reste pas moins modifié.

#### IV-4 - Conclusions

L'exploitation d'une mine se caractérise en profondeur par la création de vides que les terrains susjacentes tendent à combler; cela y provoque des perturbations qui peuvent se propager jusqu'à la surface.

Différents facteurs tels que la profondeur de la couche, son pendage, la nature des terrains, déterminent l'importance et l'allure des mouvements de surface. Un des facteurs primordial semble être le type de contrôle des vides de l'arrière taille qui peut faire varier de 25 % à 90 % de la hauteur de la couche exploitée l'amplitude du mouvement vertical mesuré en surface.

Outre son influence sur la structure même des terrains (fissurations, affaissements), une mine s'accompagne en surface de dépôts divers sous forme de remblais ou de terrils affectant la morphologie et le comportement hydraulique des zones superficielles.

## V - Place du site étudié dans le cadre régional

La zone étudiée se situe dans la partie ouest du bassin sédimentaire houiller, dans un triangle grossièrement compris entre La Ricamarie à l'est, Unieux à l'ouest et Roche-la-Molière au nord. Elle appartient au bassin versant de la Loire et couvre partiellement les bassins versants de l'Ondaine au sud et du Lizeron au nord.

La vallée de l'ondaine est une vallée très industrialisée orientée Est-ouest et traversant d'amont en aval dans le bassin houiller, les agglomérations de La Ricamarie, le Chambon-Feugerolles, Firminy, Unieux ; pour lesquelles elle constitue le collecteur principal des eaux usées.

La vallée du Lizeron n'est pas urbanisée mais prend naissance au confluent de trois ruisseaux (Péchier, Pommaraise, Pirafoy) drainant la ville de Roche-la-Molière.

D'un point de vue géologique la zone considérée se situe dans le comble sud du bassin houiller, où le gisement est charrié en trois unités superposées. Les terrains exploités par les concessions de Roche-la-Molière et Firminy, Montrambert, et la Béraudière sont inclus dans les couches de Saint-Etienne et plus exactement dans les unités charriées n°2 et 3.

Le nombre de couches exploitées est important, leur profondeur très variable et le mode de contrôle de l'arrière taille a varié au cours du temps (la dernière méthode employée est le foudroyage).

Actuellement en surface il n'y a plus beaucoup de zones en mouvement mais les affaissements ont été importants.

La topographie de la zone est en générale bien contrastée mais certaines petites vallées, comme la vallée du Merdant à La Ricamarie sont entièrement remblayées. Les petits cours d'eau circulant à l'aplomb de travaux miniers sont en général canalisés, afin d'éviter qu'ils disparaissent dans le sous-sol par le biais des fractures créées par les travaux (ce phénomène a souvent été constaté par le passé et de nombreux ruisseaux de faible importance, existant sur les cartes anciennes, ont aujourd'hui disparu).

Il existe évidemment sur cette zone des terrils qui ont pris une

importance croissante avec l'utilisation du foudroyage mais restent moins élevés que ceux de Saint-Etienne. D'autre part l'existence d'aciéries dans la vallée de l'Ondaine implique la présence de crassiers qui ajoutés aux terrils modifient aussi la morphologie du paysage et le comportement hydraulique local des terrains.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE  
L'INFLUENCE DE L'ARRET DE L'EXHAURE MINIERE

## I - Introduction

Le milieu qui fait l'objet de cette étude est très influencé par le travail de l'homme, ce qui justifiait la présentation un peu approfondie qui en a été faite en première partie.

Après cette prise de connaissance du milieu, il faut aborder l'étude du problème que pose l'arrêt de l'exhaure minière dans cet environnement un peu particulier.

L'étude des nappes aquifères, leur bilan en eau permettent dans un premier temps de prévoir le lieu et le mécanisme de l'apparition des émergences.

Après avoir émis différentes hypothèses concernant le comportement hydrodynamique possible des différentes unités d'exploitation minière, nous étudierons sur le terrain quelles peuvent en être les conséquences, afin de proposer une stratégie de surveillance optimale du milieu permettant de dominer le mieux possible la remontée du niveau de l'eau liée à l'arrêt de l'exhaure minière.

## II - Définition des systèmes aquifères et bilan en eau

### II-1 - Définition des systèmes aquifères

#### II-1-1 - Les terrains houillers.

##### II-1-1-1 - Nature des terrains

Les terrains houillers productifs du bassin carbonifère de Saint-Etienne se présentent comme une accumulation de terrains sédimentaires alternant grès, schistes et charbons.

A l'état naturel, c'est à dire s'ils ne sont pas exploités, ces terrains ont un coefficient de transmissivité qu'on s'accorde pour situer autour de  $10^{-7}$  à  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s (PHILLIP R. DAVIS; WILLIAM C. WALTON 1982).

La campagne de forages de reconnaissance faite par les

Houillères en 1954 montre que ces terrains ne sont en général pas aquifères (un seul forage sur les 69 réalisés a rencontré de l'eau).

L'étude tectonique du bassin stipule que ces terrains sont morcellés par des failles qui, pour le secteur étudié, sont essentiellement des failles de charriage qui laminent et "schistifient" localement les terrains. La conductivité hydraulique de ces failles est donc extrêmement faible.

Les zones exploitées acquièrent une fracturation supplémentaire qui se développe depuis les galeries et les fronts de taille jusqu'à la surface, sous la pression des terrains superficiels qui tendent à combler les vides laissés par les travaux.

Les fractures ainsi créées sont ouvertes et jouent un rôle de drain, conférant aux zones exploitées une porosité supplémentaire et un coefficient de perméabilité plus élevé que celui des secteurs où les terrains sont restés inexploités.

La structure de ces zones n'est pas sans rappeler celle d'un milieu fissuré karstique, où la porosité de fracture se surimpose à la porosité de matrice. Elle en diffère cependant par le fait que la distribution des directions de fracture est aléatoire et que l'augmentation éventuelle du volume des vides n'est pas due à des dissolutions de matériaux mais à l'extraction de ces matériaux par l'homme.

## II-1-1-2 - Détermination des caractéristiques des terrains houillers.

### a - Un problème aux conditions limites

Il importe de préciser les conditions aux limites du système où se produira la remontée du niveau de l'eau :

#### - les conditions aux limites géométriques

Elles sont définies soit par les limites naturelles des concessions, qui sont les accidents tectoniques qui bordent les zones de travaux (faille de Dourdel-Montsalson au sud de la concession de Roche-la-Molière, par exemple), soit par les limites "artificielles" dues aux contraintes mécaniques

exercées sur les roches encaissant les zones d'exploitation minières et qui provoquent des relais de fissuration comme nous les avons décrits en première partie.

- les conditions aux limites hydrauliques

Les accidents tectoniques qui bordent les concessions minières sont des zones très comprimées (failles de charriage) et sont le site de formations schisteuses constituant des limites imperméables. Les terrains au delà de l'influence des travaux miniers ont des coefficients de perméabilité très faibles ( $10^{-7}$  m/s), on est donc en droit d'assimiler la limite d'influence à une limite imperméable.

Les concessions peuvent donc être assimilées à des portions de nappe de fissures, libres, délimitées par des écrans imperméables.

La campagne de sondages profonds de reconnaissance effectuée par les houillères en 1954 apporte un argument confirmant cette hypothèse: parmi tous les forages réalisés hors concession, un seul a rencontré un niveau d'eau statique (celui sans doute d'une nappe superficielle ou d'une petite nappe captive localisée dans un banc de grès).

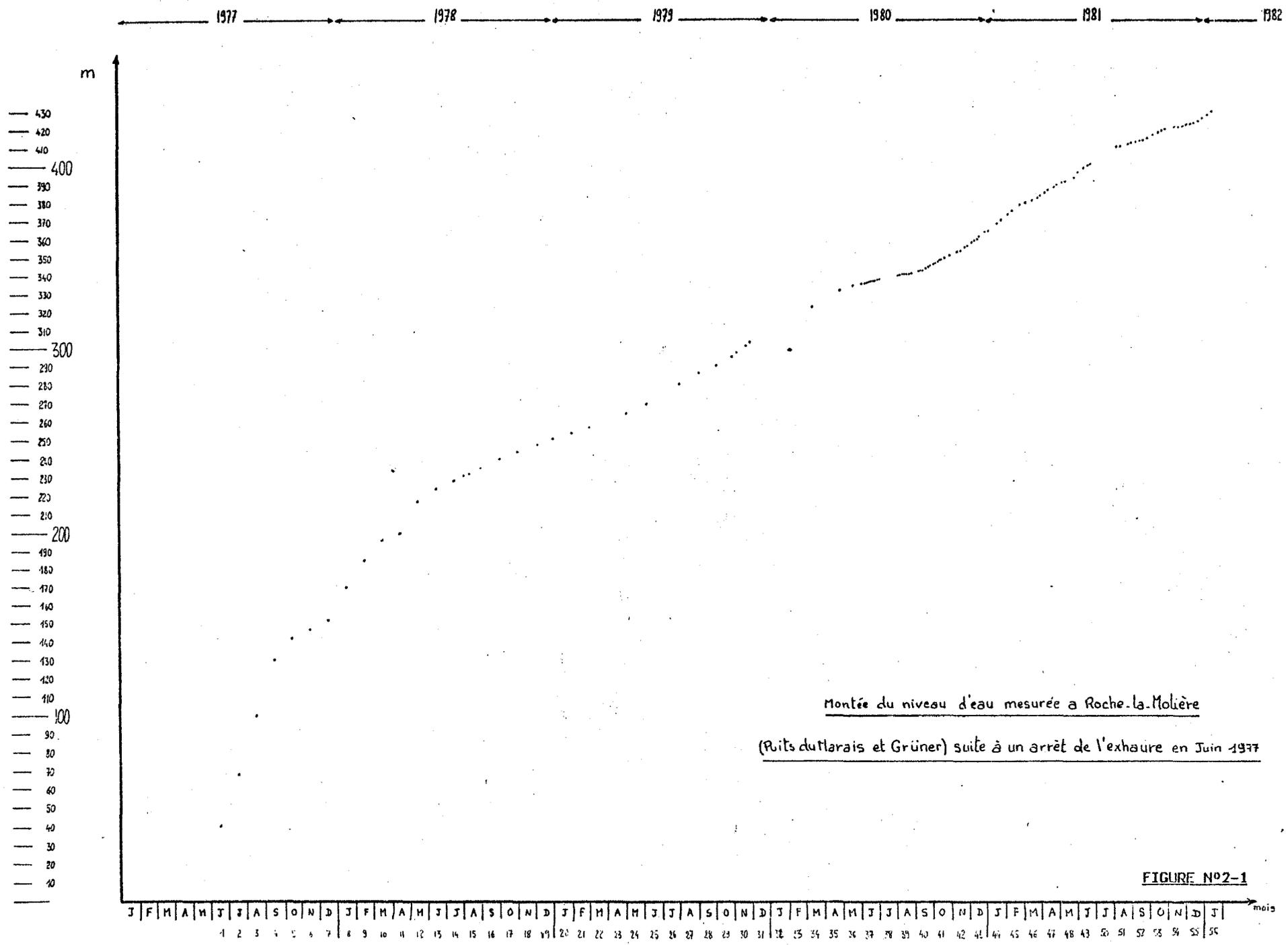
b - Estimation du coefficient d'emmagasinement

\* les données existantes :

Le document essentiel disponible est celui du suivi de la remontée du niveau des eaux au puits du Marais et au puits Grüner, après un arrêt momentané de l'exhaure dans la concession de Roche-la-Molière en Juin 1977.

Ce suivi a permis d'établir une courbe de remontée des eaux, à partir de laquelle nous essaierons de déduire le coefficient d'emmagasinement de la concession, en tenant compte des connaissances que nous avons pu acquérir sur cette zone d'exploitation.

Des courbes de remontée obtenues dans d'autres sites, peuvent être considérées comme moins significatives que celles ci, car de moins longue durée. Néanmoins, grâce à certaines observations on est autorisé à attribuer à leur environnement des caractéristiques géométriques de même nature et des propriétés hydrauliques de même ordre de grandeur que celles de la



Montée du niveau d'eau mesurée à Roche-la-Molière

(Ruiss du Larais et Grüner) suite à un arrêt de l'exhaure en Juin 1977

**FIGURE N°2-1**

concession de Roche-la-Molière (mais on doit tenir compte de l'ancienneté de la concession ainsi que du mode d'exploitation).

Le tracé sur repère arithmétique de la courbe exprimant la cote du niveau de l'eau en fonction du temps revêt une allure logarithmique dans sa première partie puis montre ensuite une variation relativement linéaire du niveau de l'eau, qui peut être interprétée comme le remplissage d'un réservoir.

\* Calcul de S

La courbe étudiée représente le remplissage de la concession de Roche-la-Molière sous l'influence d'un débit injecté, relativement constant à l'échelle utilisée, dont la valeur est celle de la pluie efficace qui s'infiltré dans le réservoir que constitue la concession.

Certaines variations du rapport  $dH/dt$  correspondent à des paliers localisés sur la courbe se produisant au niveau des galeries latérales constituant une "recette" (galerie de communication entre un niveau de travaux et le puits).

Le calcul de la porosité efficace des terrains de la concession peut s'effectuer de la façon suivante:

- Soit  $V$  le volume de terrains influencés par l'exploitation sous la cote 416 (calculé en tenant compte de l'extension horizontale des travaux et de l'angle limite d'influence):

$$V = 7,5 \cdot 10^8 \text{ m}^3$$

-  $t$  le temps écoulé entre le premier et le dernier jour de l'expérience

$$t = 1710 \text{ jours}$$

-  $V'$  le volume de vides est égal au volume de pluie infiltrée:

$$V' = 220 \cdot 10^{-3} / 365 (\text{m/j}) \cdot 1710 (\text{j}) \cdot 5,2 \cdot 10^6 (\text{m}^2) = 5,36 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

↑ pluie efficace     
 ↑ temps     
 ↑ surface concession

La porosité efficace qui en résulte est de l'ordre de 0,7%.

Compte tenu du fait que la nappe aquifère constituée par les

terrains houillers est une nappe libre, la valeur de la porosité efficace est celle du coefficient d'emmagasinement.

Le même type de calcul a été effectué, notamment pour la concession de Montrambert, suite à l'observation de la remontée du niveau de l'eau entre les cotes -420 m. et -320 m..

Les travaux situés entre ces deux cotes sont tous relativement récents, il en résulte que la connaissance du milieu est bonne (aucuns travaux anciens ne peuvent venir fausser le calcul du volume influencé par l'exploitation).

Le coefficient d'emmagasinement calculé est de 1,2%.

#### \* La transmissivité

Les valeurs de transmissivité des terrains houillers exploités et non exploités, ont été estimées à l'aide d'essais par pompage effectués dans des piézomètres mis en place en divers points stratégiques de la vallée de l'Ondaine.

Les valeurs obtenues ne peuvent être prises en compte que comme ordre de grandeur pour ce paramètre compte tenu des moyens avec lesquels les essais ont été réalisés :

- Les piézomètres ont un diamètre intérieur de 104 mm. (figure n°2-20), et une profondeur d'environ 25m., ils sont tubés en acier, la crépine représente en général le 1/3 basal du piézomètre, elle est réalisée en pratiquant des fentes horizontales dans l'acier à l'aide d'une scie. Ces ouvrages ne sont absolument pas prévus pour y pratiquer des pompages, mais simplement pour y mesurer des niveaux d'eau et y prélever des échantillons.
- La pompe est une pompe "Flyght" de 4" dont le débit est de  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  non modulable, ce qui pose des problèmes compte tenu de la remarquable hétérogénéité des terrains rencontrés (pour ce même débit, certains de nos piézomètres se vident en 10 mn., alors que d'autres présentent des rabattements n'excédant pas 1 m.).
- Le faible diamètre des piézomètres rend extrêmement difficile

l'introduction simultanée de la pompe et d'une sonde dans l'ouvrage, la position de l'une et de l'autre sont difficiles à estimer et les erreurs de mesure peuvent être non négligeables.

Parmi tous les essais effectués, certains ont cependant pu être retenus, la fiabilité des résultats reste cependant précaire compte tenu des difficultés exposées ci-dessus.

Pour les piézomètres implantés dans des terrains peu perméables, la vidange de l'ouvrage se faisant rapidement, c'est à partir de la courbe de remontée du niveau de l'eau que la transmissivité a été calculée.

La méthode employée est la méthode de JACOB :

$$s = \frac{0,183.Q}{T} \log \frac{2,25.T.t}{r^2 S}$$

Dans le cas d'une remontée, l'équation est la suivante :

$$s = \frac{0,183.Q}{T} \log \frac{t}{t'}$$

- s : niveau de l'eau en mètres (rabattement)

- T : transmissivité du milieu en  $m^2/s$

$$T = K.e$$

K : coefficient de perméabilité du milieu en m/s

e : épaisseur de l'aquifère en m

- r : distance du point de mesure au point de pompage

- t : temps écoulé depuis le début du pompage en secondes

- t' : temps écoulé depuis l'arrêt du pompage en secondes

- Q : débit du pompage en  $m^3/s$

#### Limites d'utilisation:

Rappelons que cette équation est un artifice de calcul permettant une étude simple du phénomène, et découle du principe de superposition qui permet d'analyser très rapidement et simplement les phénomènes consécutifs à l'arrêt des pompes dans la nappe:

$$s = \frac{0,183.Q}{T} \log \frac{2,25.t.T}{r^2 S} - \frac{0,183.Q}{T} \log \frac{2,25.t'.T}{r^2 S}$$

On représente en général  $s$  en fonction du logarithme de  $t/t'$ ; la pente  $i$  de la droite obtenue permet alors de calculer :

$$T = \frac{0.183 \cdot Q}{i}$$

Les courbes de rabattement en fonction du temps pour les essais retenus, ainsi que les calculs correspondants sont exposés dans l'annexe n°2.

Le piézomètre de l'usine Creusot-Loire est implanté dans des terrains exploités.

La transmissivité calculée pour cet ouvrage est de :

$$T = 0,0127 \text{ m}^2/\text{s}$$

Si l'on estime l'épaisseur des nappes superficielles à une trentaine de mètres, on retiendra une valeur de perméabilité des terrains exploités de l'ordre de :

$$P = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Celui de la Zone industrielle Chauvetière implanté dans des grès sus-jacents à une zone exploitée donne une idée de la perméabilité de fissure liée à l'exploitation, on retiendra  $P = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  comme valeur minimale, pour les étages les moins exploités d'une concession.

Les autres piézomètres implantés dans des terrains non exploités montrent des valeurs de  $T$  très variables mais toujours excessivement faibles, la valeur de la perméabilité retenue pour les terrains non exploités sera :

$$P = 7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s.}$$

### II-1-1-3 - Interprétation géométrique du réservoir aquifère

L'analyse des conditions aux limites géométriques (issues des contraintes mécaniques) et hydrauliques, impliquées par l'interprétation de la courbe de remontée dans les puits du Marais et Grüner, conduit à s'imposer un schéma de fonctionnement hydraulique dans un espace géométrique déterminé pour la concession de Roche-la-Molière.

Chaque concession du système constitue un compartiment correspondant aux zones des terrains houillers exploités. Ce compartiment est en général limité par des failles bordières ou des zones de changement de faciès correspondant à la limite d'influence des travaux en surface et en profondeur (figure n°2-2). Les limites des divers compartiments peuvent être considérées comme imperméables.

L'existence d'autres courbes de remontée, en particulier sur la concession de Montrambert (entre les cotes -420 et -320), ainsi que la faible conductivité hydraulique des terrains non exploités permettent d'utiliser pour les autres concessions du système étudié un schéma comparable à celui déterminé pour la concession de Roche-la-Molière.

Ce schéma de fonctionnement servira de base pour modéliser le système au niveau de la concession puis au niveau de l'ensemble des divisions de l'exploitation minière.

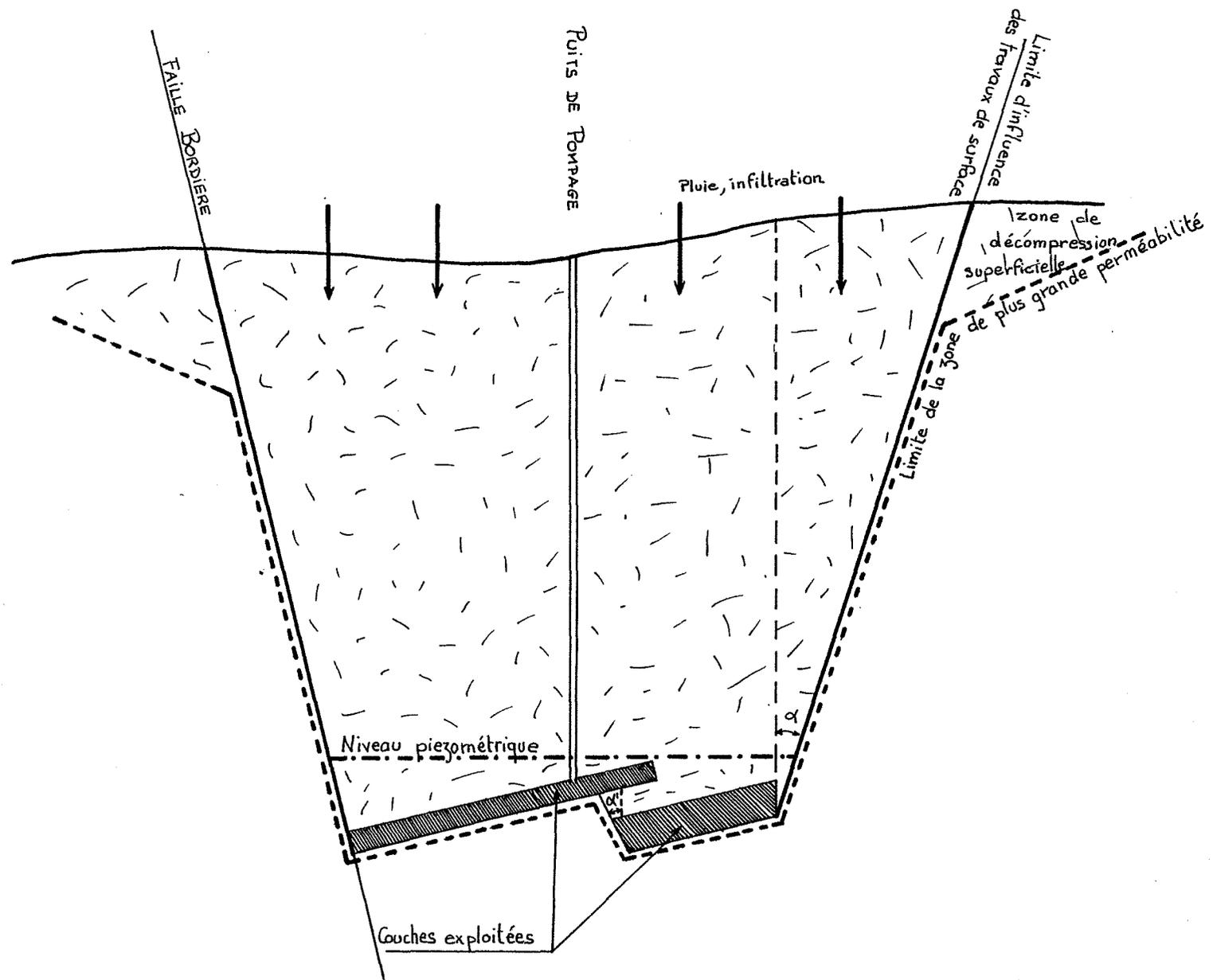
Il guidera le procédé de discrétisation du champ d'étude (domaine bi-dimensionnel coupe) et déterminera le choix du maillage, l'emplacement et la nature des conditions aux limites.

Par ailleurs, les ordres de grandeur des caractéristiques du terrain aquifère déterminées à partir des courbes expérimentales, serviront de base pour initialiser les valeurs de T et S. Ces facteurs déterminent, en effet, la sensibilité du modèle à établir, dont le calage pourra être assuré par leur ajustement progressif.

#### II-1-1-4 - Description du système aquifère minier

Le secteur de notre étude apparaît constitué de terrains dotés de faibles perméabilités ( $K = 5.10^{-6}$  m/s) dans lesquels les travaux miniers ont entraîné localement l'apparition de zones privilégiées à perméabilité plus forte et dans lesquelles le volume des vides est très important.

Ces zones privilégiées se localisent au niveau des différentes concessions et constituent un ou plusieurs aquifères de volume déterminé, limités soit par des terrains vierges, soit par des failles.



**FIGURE N°2-2**

Schéma interprétatif de l'aquifère lié à la mine

Chacune de ces concessions peut être reliée, ou non, à la voisine par une ou plusieurs galeries au rocher traversant les failles ou les terrains non exploités.

Nous avons ainsi dénombré sur le secteur de notre étude 6 zones exploitées distinctes correspondant à: (fig n°2-3)

- |                                   |   |                  |
|-----------------------------------|---|------------------|
| - la division de Roche-la-Molière | } | CONCESSIONS DE   |
| - la division de Varenne          |   | ROCHE-LA-MOLIERE |
| - la division de Malafolie        |   | ET FIRMINY       |
| - la division de la Tour          |   |                  |
| - la concession de Montrambert    |   |                  |
| - la concession de la Béraudière  |   |                  |

Au nord, la concession de Roche-la-Molière s'étend à la fois sur les bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron entre lesquels elle permet des transferts de débits souterrains d'un bassin à l'autre.

Limitée au sud par la faille de Dourdel-Montsalson et partout ailleurs par des terrains non exploités, elle a été reliée au cours de l'exploitation à la division de Varenne située plus au sud par deux travers-bancs:

- l'un à la cote +11 est actuellement obturé par un serrement
- l'autre à la cote 455 (travers banc Bouchetière) constitue la seule liaison encore existante avant arrêt de l'exhaure.

La division de Varenne s'étend du nord au sud entre la division de Roche-la-Molière et celle de Malafolie.

Elle est limitée au nord par la faille de Dourdel-Montsalson, au sud par celle des Trois ponts, à l'est et à l'ouest par des terrains non exploités.

Elle communique au nord avec Roche-la-Molière, et à l'est avec la concession de Montrambert par deux travers bancs partant de la cote -136 et arrivant respectivement aux cotes -320 et -420; au sud elle communique avec la concession de Malafolie par de nombreuses galeries traversant la faille des Trois Ponts, essentiellement celles ouvertes aux cotes +100 et +140.

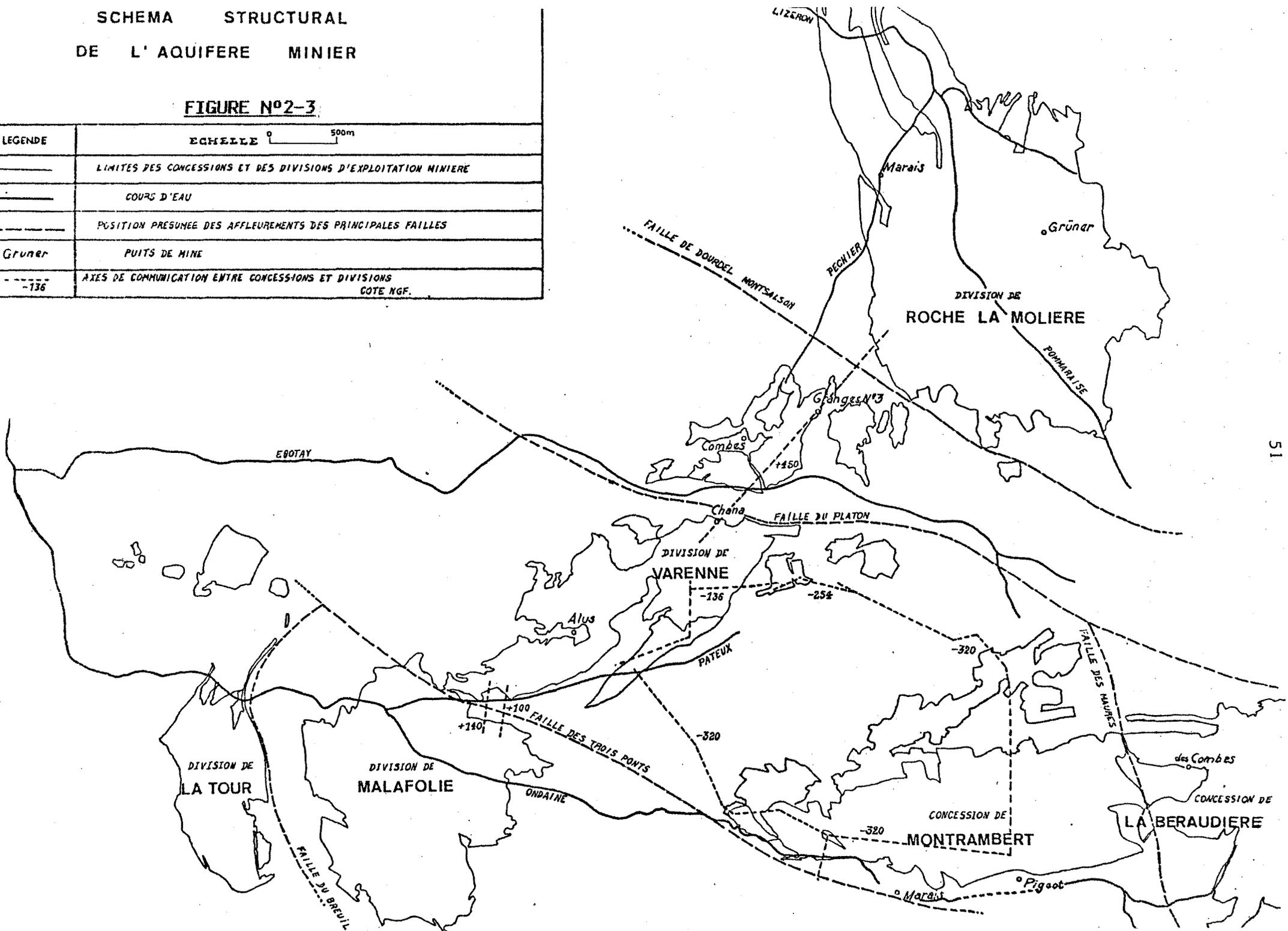
La division de Malafolie, plus ancienne, est limitée au nord par la faille de Trois Ponts, au sud et à l'ouest par des terrains vierges.

Elle jouxte à l'ouest l'ancienne division de la Tour de laquelle

SCHEMA STRUCTURAL  
DE L' AQUIFERE MINIER

FIGURE N°2-3

LEGENDE	EGHELLE 0 500m
—	LIMITES DES CONCESSIONS ET DES DIVISIONS D'EXPLOITATION MINIERE
—	COURS D'EAU
- - - -	POSITION PRESUNEE DES AFFLEUREMENTS DES PRINCIPALES FAILLES
o Gruner	PUITS DE MINE
- - - - -136	AXES DE COMMUNICATION ENTRE CONCESSIONS ET DIVISIONS COTE NGF.



elle est séparée par la faille du Breuil; les archives n'ont révélé aucune communication entre ces deux divisions.

A l'est de cet ensemble Roche-la-Molière, Varenne, Malafolie se trouvent les concessions de Montrambert et de la Béraudière.

Toutes deux limitées au sud par la faille des Trois Ponts, elles sont séparées l'une de l'autre par la faille des Maures. Une seule communication semble relier ces deux concessions à la cote +357, cette galerie a été depuis fort longtemps obstruée par un serrement (en 1893).

Cependant, les travaux de ces deux concessions sont dans certains cas superposés, ce qui rend possible des communications par l'intermédiaire de fissures résultant de l'exploitation.

La concession de la Béraudière empiète légèrement sur le bassin versant du Furan (Saint-Etienne) par de petits travaux en 13° Beaubrun qui semblent isolés du reste de la concession.

Tout le système précédemment décrit est relié avec les travaux de Saint-Etienne par un travers-banc à la cote -320; mais ce travers banc est actuellement obstrué par un serrement très récent; il n'y a donc plus aucune communication entre les deux systèmes.

En conclusion, l'aquifère résultant des travaux miniers apparait formé de 6 sous ensembles parfois reliés entre eux, se répartissant au nord au sud et à l'est de la division de Varenne (qui constitue en quelque sorte la "plaque tournante" des écoulements du système, de part sa position centrale dans l'ensemble des concessions décrite ci-dessus, et dont les éventuelles liaisons ne se font que de manière contigue).

## II-1-2 - Nappes superficielles

Des études très récentes effectuées par le B.R.G.M. sur le site de Saint-Etienne (1980) montrent qu'il existe des nappes superficielles associées soit aux alluvions des cours d'eau quand elles existent, soit à divers remblais d'origine "urbaine" ou "minièrè". Les remblais d'origine "urbaine" sont liés à la construction de bâtiments et d'ouvrages d'art; les remblais d'origine "minièrè" sont ceux situés sur le site d'anciennes exploitations de couches de

charbon à l'affleurement (l'exploitation de ces couches s'accompagne obligatoirement de la remise en état du site à la fin des travaux par remblayage de la fosse creusée).

Les données dont nous disposons sur le secteur de notre étude sont peu importantes; cependant il y a tout lieu de croire que le comportement est le même que sur le secteur de Saint-Etienne.

Ces nappes superficielles se localiseraient donc:

- 1- en zones urbaines où de nombreux quartiers peuvent être aplanis par remblayage. Ces nappes sont alors très localisées et leur puissance est faible (Debaisieux 1983).
- 2- dans les zones d'affleurement des couches de charbon. Dans ce cas l'aquifère peut être plus étendu et atteindre une puissance de 20 m.
- 3- dans les alluvions de l'Ondaine (les autres ruisseaux ne présentant pas de dépôts d'alluvions très importants, et les alluvions y sont en générale peu perméables), la nappe que peut contenir ces alluvions a une extension latérale relativement peu importante, les alluvions sont assez perméables, mais la grande quantité de fines de charbon charriées par l'Ondaine peut y provoquer localement des colmatages.

La vallée de l'Ondaine est la zone la plus urbanisée sur le site étudié; on peut supposer que c'est là que se localiseront les plus grands nombres de nappes aquifères superficielles de type alluvial ou de type remblai "urbains".

Il est donc possible de dresser une carte d'emplacements potentiels ou reconnus de nappes superficielles (figure n°2-4).

Le mode d'écoulement et les caractéristiques de ces aquifères sont difficiles à définir.

Les débits qui en sont issus peuvent rejoindre les écoulements superficiels, ou bien descendre par drainance dans les terrains sous-jacents, dans ce cas, elles forment des "zones tampons" entre la pluviométrie extérieure et la nappe contenue dans les terrains houillers exploités en retenant momentanément l'eau avant qu'elle ne s'infilte plus profondément.

Les visites sur le terrain ont montré qu'il n'existe pas de sources à l'aplomb des travaux houillers exploités, il est donc permis de penser que les nappes superficielles existant éventuellement sur de tels sites équilibrent le bilan de leurs flux en alimentant par drainance, les terrains sous-jacents de l'aquifère minier.

Le calcul du bilan en eau des différentes concessions appuie cette hypothèse: le total de la pluie efficace infiltrée sur une concession, est en général retrouvé dans les débits d'exhaure; il n'y a donc pas ou très peu de débits perdus entre la surface et les travaux d'exploitation en profondeur.

A l'inverse, le bilan des bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron montre que la presque totalité des précipitations efficaces se retrouve en ruissellement sur des secteurs non exploités; dans ce cas les nappes superficielles présentent obligatoirement une zone d'émergence visible sur le terrain ou localisée dans le lit d'un cours d'eau.

### II-1-3 - Conclusions et schématisation du milieu

La région de Saint-Etienne se trouve dans un bassin sédimentaire houiller, entouré de massifs cristallins.

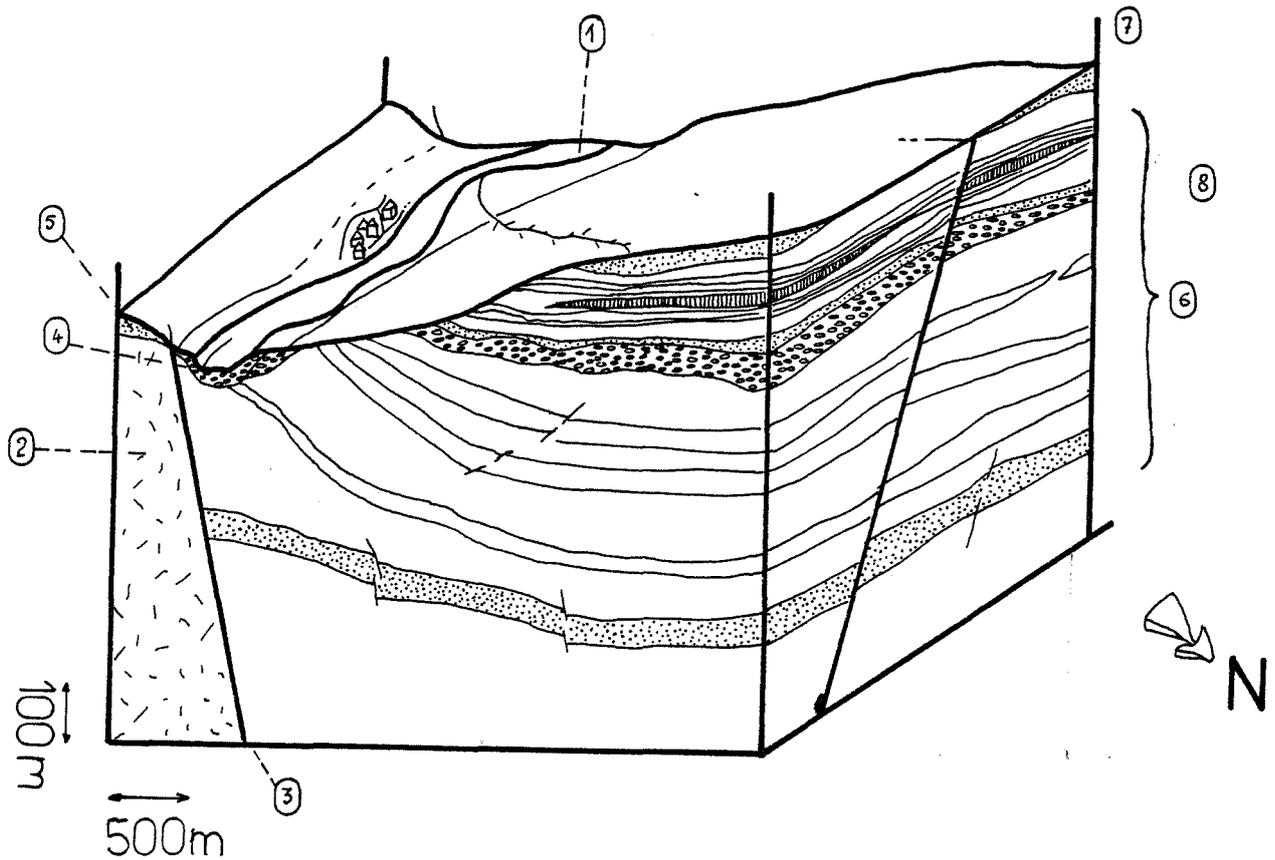
Ce bassin est naturellement très morcellé par des failles dont certaines peuvent s'accompagner de charriage. Toutes semblent très imperméables. Il a été soumis depuis très longtemps à une intense exploitation des couches de charbon qui a entraîné des modifications importantes du milieu.

L'influence de l'exploitation se fait sentir sur la structure des terrains, dans lesquels le creusement des galeries et des fronts de tailles s'accompagne de la création de fissures qui se propagent jusqu'à la surface et entraînent l'apparition de zones d'affaissement.

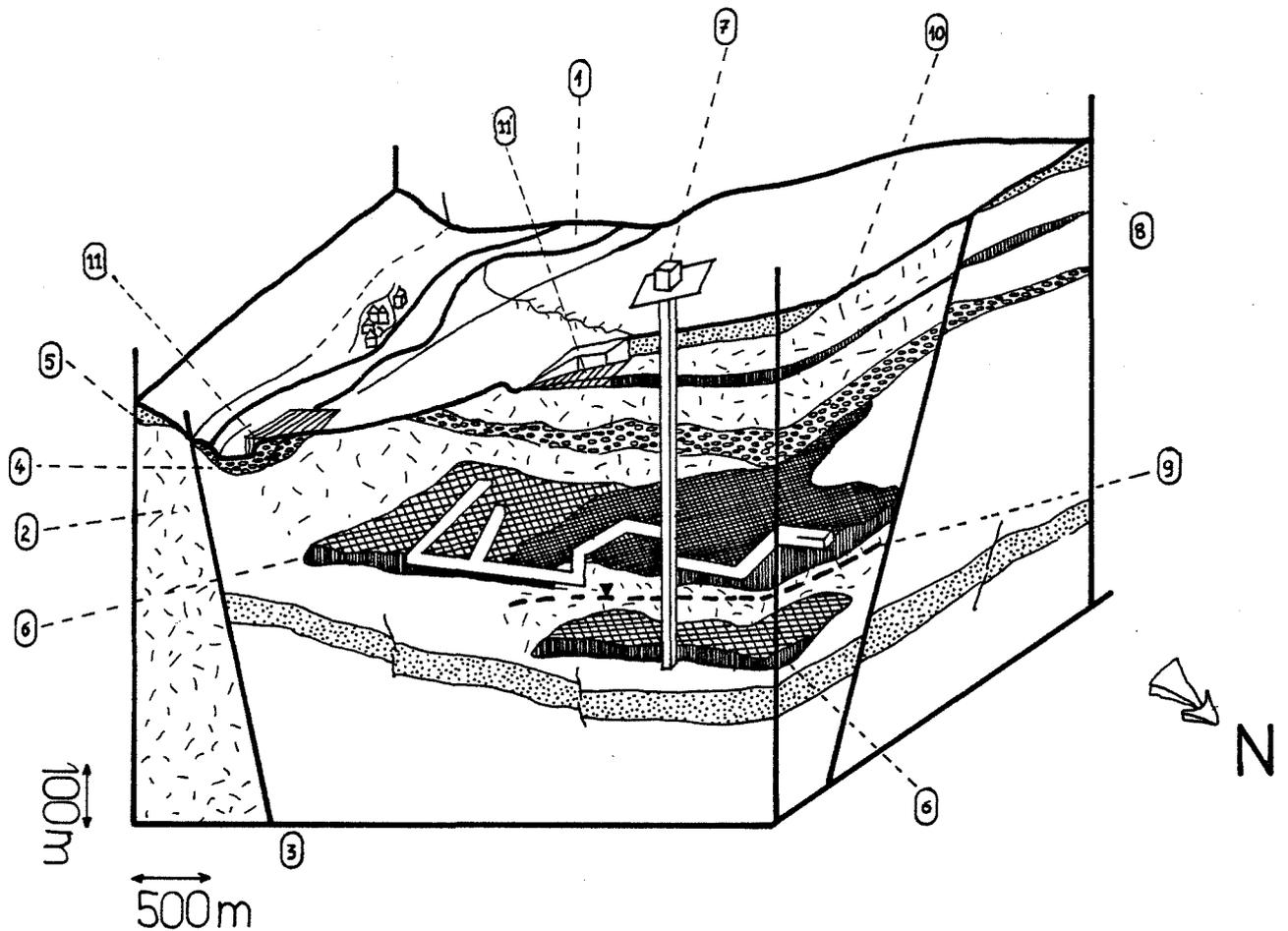
Cette modification de structure provoque des changements dans les réactions hydrauliques du milieu, aussi bien en surface, où nappes superficielles et ruisseaux peuvent disparaître en s'infiltrant dans les terrains sous-jacents, qu'en profondeur, où les paramètres hydrodynamiques du milieu évoluent en augmentant au cours de l'exploitation.

L'histoire hydrogéologique d'une région minière peut donc se schématiser en trois phases :

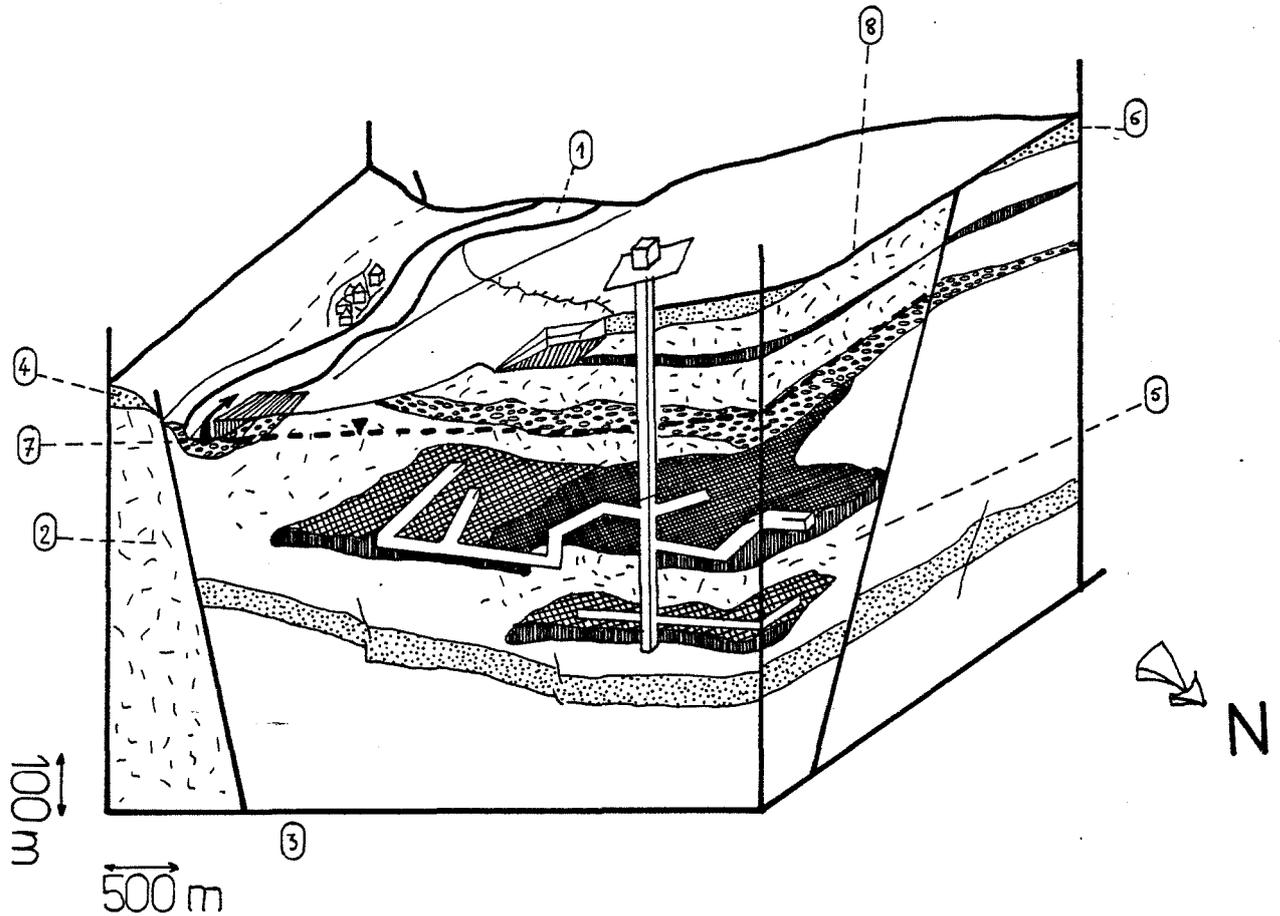
II-1-3-1- Avant l'exploitation du charbon, le milieu se présentait de la façon suivante :



- 1 - Ondaine
- 2 - Massif cristallin
- 3 - Faille du Pilat
- 4 - Nappe alluviale de l'Ondaine
- 5 - Nappe superficielle sur terrain cristallin (nappe "d'arènes")
- 6 - Série sédimentaire : alternance de grès, schistes, charbons, conglomérats
- 7 - Nappe superficielle sur terrain sédimentaire
- 8 - Nappe captive dans un niveau gréseux (la série sédimentaire du houiller est très peu perméable dans son ensemble. Elle ne contient que quelques rares nappes peu épaisses dans des bancs de grès et de conglomérats.)

II-1-3-2 - Pendant l'exploitation du charbon

- 1 - Ondaine
- 2 - Massif cristallin
- 3 - Faille du Pilat
- 4 - Nappe alluvial de l'Ondaine, colmatage partiel lié au rejet de fines de charbon.
- 5 - Nappe "d'arènes"
- 6 - Panneau de charbon exploité
- 6'- Panneau anciennement exploité
- 7 - Puits d'exploitation
- 8 - Fracturation surimposée due à l'exploitation : cette fracturation facilite l'infiltration de l'eau de pluie, des nappes superficielles, et des cours d'eau s'ils ne sont pas canalisés.
- 9 - Niveau de l'eau maintenu par pompage sous les exploitations
- 10 - Les travaux créent des affaissements de surface qui compensent les vides ouverts au fond.
- 11 - Nappes superficielles en remblais urbains(11)ou miniers(11').

II-1-3-3 - Après arrêt de l'exploitation du charbon

- 1 - Ondaine
- 2 - Massif cristallin
- 3 - Faille du Pilat
- 4 - Nappe "d'arènes".
- 5 - Zone à forte perméabilité correspondant aux travaux et à la fracturation qui y est liée (l'ensemble, entouré de terrains à très faible perméabilité se comporte comme un réservoir)
- 6 - Les nappes superficielles reprennent un peu d'importance
- 7 - Le niveau de l'eau est remonté jusqu'à ce que la nappe contenue dans les travaux trouve un exutoire dans le point bas
- 8 - Au bout d'un certain nombre d'années, les zones d'affaissement se stabilisent.

### II-1-3-4 - Conclusions

Les mines de charbon ont créé un réseau aquifère qui n'existait pas avant l'exploitation. La structure de cet aquifère est très proche de celle d'un magasin karstique, à savoir qu'il est constitué d'une matrice à porosité d'interstice, à laquelle se surimpose une porosité de fracture et une porosité liée aux galeries. Il est limité par des terrains houillers non exploités, pratiquement imperméables, qui séparent les zones exploitées les unes des autres. Cet ensemble constitue un réseau de réservoirs qui communiquent parfois entre eux par l'intermédiaire de galeries.

Ce réseau va se remplir d'eau sous l'influence de la pluie, le niveau de l'eau remontera jusqu'à trouver un exutoire dans les points bas.

A coté de cette nappe principale contenue dans les zones exploitées, les nappes superficielles sont très localisées et de faible importance.

### II-2 - Bilan en eau du système

#### II-2-1 - Eaux de surface

En surface, le secteur de notre étude s'étend partiellement sur les bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron, il représente la moitié du bassin versant de l'Ondaine et le tiers de celui du Lizeron.

Tous les affluents rive gauche de l'Ondaine sont issus des monts du Pilat (ce qui lui procure un régime de débits de type torrentiel), et ne circulent pas, ou seulement sur la fin de leur parcours sur des terrains houillers exploités avec les particularités que cela comporte. Quant au lizeron, l'essentiel de son parcours se fait sur les conglomérats de base du stéphanien, seuls les trois cours d'eau desquels il est issu (Péchier, Pommaraise, Pirafoy) prennent naissance et circulent sur les terrains houillers exploités.

Outre cette particularité concernant l'hétérogénéité des bassins versants, l'Ondaine et le Lizeron se caractérisent par le fait qu'ils constituent les collecteurs principaux des eaux usées industrielles et domestiques de toutes les agglomérations qu'ils traversent. Cette situation

provoque des modifications qualitatives de l'eau, que nous étudierons en 3° partie, mais aussi des modifications quantitatives des débits, qu'il faudra évaluer, et dont il faudra éventuellement tenir compte lors du calcul du bilan en eau.

#### II-2-1-1 - Ondaine

Les données disponibles concernant le débit de l'Ondaine sont les suivantes :

- Une mesure régulière du débit de l'Ondaine au Pertuiset a été faite en 1972 par le cabinet Marc Merlin lors de l'étude hydraulique préliminaire à la construction de la station d'épuration au Pertuiset, le débit moyen retenu est compris entre 620 et 650 l/s.
- L'Institut Pasteur de Lyon, en 1964, mesurait un débit moyen de temps sec (jours précédés d'au moins 72 heures sans précipitation) de 560 l/s
- Lors de l'étude de la pollution du bassin de l'Ondaine en 1969, la SETUDE a effectué des mesures au limnigraphe et au micromoulinet, le débit moyen de temps sec retenu au Pertuiset est de 610 l/s.
- B. Debaisieux (1983) retient, par ailleurs, une valeur moyenne de 670 l/s.

Toutes ces données sont issues de mesures sur le terrain, elles englobent donc les débits correspondant aux eaux usées dont il faut mesurer l'importance, pour déduire le débit naturel de l'Ondaine.

La consultation du P.O.S. (Plan d'Occupation des Sols) pour les villes se trouvant sur la vallée de l'Ondaine a permis de déterminer les apports d'eau extérieurs au bassin versant transitant par les divers réseaux d'adduction:

- La commune de La Ricamarie est alimentée en eau par un barrage situé sur l'Ondenon (haut cours de l'Ondaine), elle possède, en outre, une prise d'eau d'appoint sur l'acqueduc du Lignon (bassin versant différent de celui de l'Ondaine) qui alimente la ville de Saint-Etienne, cette prise, qui constitue un apport extérieur, n'excède pas  $10.000 \text{ m}^3$  par an soit 0,3 l/s.

- Une partie de la ville de Fraisses est alimentée par des eaux issues

d'un barrage situé sur la Semène (affluent de la Loire en amont de l'Ondaine), cet apport doit être de l'ordre de 10.000 à 20.000 m<sup>3</sup>/an.

- Il faut aussi tenir compte des eaux industrielles : certaines industries de la vallée sont alimentées par l'eau de la Loire, le débit distribué a été estimé à 70.000 à 150.000 m<sup>3</sup>/an soit 2,2 à 4,8 l/s.

- Les mesures citées ont été effectuées alors que l'exhaure minière existait encore et se déversait dans l'Ondaine avec un débit de 5700 m<sup>3</sup>/j, soit : 65 l/s.

L'apport extérieur total peut donc être estimé à 70 l/s, le débit de ruissellement naturel de l'Ondaine reste de 600 l/s.

Le débit spécifique moyen (par Km<sup>2</sup> de bassin versant) s'établit alors à : 5 l/s/Km<sup>2</sup>.

Le régime de l'Ondaine est typiquement torrentiel en raison de l'importance de la pente sur les versants du Pilat et de l'étendue de la zone urbanisée dans la vallée, son débit spécifique d'étiage calculé par le S.R.A.E Rhône-Alpes en 1982 est de l'ordre de 1,5 l/s/Km<sup>2</sup> (180 l/s) ; son débit de crue décénal calculé par le Cabinet Marc Merlin lors de l'étude préliminaire à la construction de la station d'épuration du Pertuiset (1981) est de 77 m<sup>3</sup>/s.

#### II-2-1-2 - Lizeron

Nous ne disposons d'aucune mesure faite sur le Lizeron, Le débit a donc été calculé par comparaison avec celui de l'Ondaine et de divers autres cours d'eau présentant un bassin versant comparable, aussi bien du point de vue de l'altitude que de la nature du terrain.

Si l'on adopte un débit spécifique de l'ordre de 4,5 l/s/Km<sup>2</sup> (légèrement inférieur à celui de l'Ondaine car la lithologie n'est plus cristalline et les pentes demeurent plus faibles). Ceci revient à lui attribuer un débit moyen de :

130 l/s

Cette valeur calculée ne tient donc pas compte des apports extérieurs liés à l'eau industrielle ou domestique, il s'agit du débit de ruissellement naturel, que nous utiliserons directement pour le calcul du bilan

en eau.

Une mesure de débit, faite à l'aide d'un micro-moulinet en janvier 1985, donne un débit du même ordre de grandeur (débit calculé par double intégration graphique = 130 l/s), or, cette mesure a été faite en période de moyennes eaux, et à 15 heures environ, soit une heure où les apports d'eaux usées domestiques sont très faibles, on peut donc considérer que cette mesure de terrain confirme la valeur estimée auparavant comme valeur moyenne annuelle du débit de ruissellement naturel du Lizeron.

### II-2-2 - Pluie - Evapotranspiration

Il existe deux stations météorologiques proches du site de notre étude, il s'agit de celle de Saint-Etienne ville et de celle de Saint-Etienne Bouthéon (située au nord dans la plaine du Forez).

L'une, celle de Saint-Etienne, a une altitude plus élevée que la moyenne de notre site, l'autre, à une altitude plus basse, selon les résultats d'une étude régionale (SRAE 1982) concernant la répartition géographique des précipitations, l'altitude apparaît être localement le facteur prépondérant. Nous avons donc choisi pour notre étude des valeurs moyennes entre celles des deux stations, les calculs seront fait à partir de celles de la ville de Saint-Etienne puis légèrement minimisés.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 800 mm (SRAE 1982).

L'évapotranspiration potentielle est calculée par la méthode de Thornthwaite sur une année moyenne issue de statistiques de la météorologie nationale entre les années 1960 et 1981.

$$E_p = 1,6 (10 T / I)^a$$

avec :  $E_p$  = évapotranspiration potentielle mensuelle en cm

$T$  = température moyenne mensuelle en °C

$I$  =  $i_1 + i_2 + \dots + i_{12}$  (in indices mensuels de Thornthwaite)

$a$  =  $f(I)$  : coefficient de Thornthwaite

$$a = 0,49239 + 1792.10^{-5}I - 771.10^{-7}I^2 + 675.10^{-9}I^3$$

Les résultats sont les suivants :

MOIS	T (°C)	i	Ep (mm)
Janvier	2.0	0.250	6.60
Février	5.1	1.036	19.70
Mars	7.7	1.920	31.90
Avril	8.1	2.074	33.87
Mai	13.1	4.267	59.40
Juin	15.0	5.228	69.58
Juillet	20.8	8.537	101.90
Août	18.8	7.336	90.59
Septembre	15.2	5.333	70.67
Octobre	14.6	5.020	67.40
Novembre	6.8	1.595	27.60
Décembre	0.5	0.031	1.30

Le calcul de l'évapotranspiration réelle se fait en prenant une valeur de 100 mm pour la réserve facilement utilisable (RFU) du sol :

	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	
Précipitations moyennes/mois sur 2 ans	70.5	113.0	89.8	115.5	22.1	27.4	95.1	54.7	52.3	73.8	38.3	48.0	800.5
E.T.P	90.6	70.7	67.4	27.6	1.3	6.6	19.7	31.9	33.9	59.4	69.6	101.9	580.5
R.F.U	0.0	42.3	64.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	68.7	14.8	
E.T.R	85.3	70.7	67.4	27.6	1.3	6.6	19.7	31.9	33.9	59.4	69.6	101.9	575.2
Excédent:	0.0	0.0	0.0	52.6	20.8	20.8	75.4	22.8	18.4	14.4	0.0	0.0	225.2
Déficit:	-5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Soit un excédent annuel moyen de 225 mm pour la ville de Saint-Etienne. La valeur retenue sera 220 mm, valeur correspondant à la somme de l'infiltration et du ruissellement.

### II-2-3 - Bilan annuel des bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron

\* Données

- La surface cumulée des bassins versants de l'Ondaine et du

Lizeron est de  $150 \text{ Km}^2$

- La pluviométrie moyenne annuelle de 800 mm, soit un volume annuel lié aux précipitations de :

$$P = 12.10^7 \text{ m}^3/\text{an}$$

- La valeur de l'évapotranspiration annuelle retenue est de 580 mm, soit un volume annuel de :

$$ETR = 8,7.10^7 \text{ m}^3/\text{an}$$

- Le ruissellement R

Les débits moyens estimés de l'Ondaine et du Lizeron sont respectivement de 600 l/s et 130 l/s. Le volume d'eau annuel total ruisselé est donc :

$$R = 2,3.10^7 \text{ m}^3/\text{an}$$

- L'infiltration :

Si l'on considère que l'aquifère contenu dans les terrains houillers exploités récolte l'essentiel de l'eau infiltrée. Le volume moyen d'infiltration pourrait être estimé comme étant le volume d'exhaure des houillères, soit :

$$I_{(H)} = 0,33.10^7 \text{ m}^3/\text{an}$$

#### \* Bilan

A partir de ces données, il est possible de calculer un volume excédentaire ou déficitaire lié aux apports ou aux pertes latéraux ou sous-jacents au bassin :

$$P = ETR + R + I_{(H)} + V$$

$$\text{donc } V = P - ETR - R - I_{(H)} = 0,67.10^7 \text{ m}^3/\text{an}$$

Ce calcul met en évidence un volume excédentaire de 5% de la pluviométrie annuelle. Sachant que l'infiltration dans les nappes aquifères superficielles n'a pas été retenue, la zone étudiée peut être considérée comme une unité hydrogéologique indépendante des zones alentour.

Les apports et les pertes latéraux peuvent être considérés comme

nuls ainsi que les apports et les pertes sous-jacents.

II-2-4 - Bilan en eau des différentes concessions.

Il a paru intéressant d'effectuer le bilan en eau des différentes concessions minières afin de mieux appréhender le comportement hydrogéologique local lié à l'influence des travaux miniers.

Pour cela nous avons retenu la valeur de la pluie efficace : P-ETR = 220 mm.

Puis sur chacune des concessions nous avons calculé le volume lié à cette pluviométrie efficace en fonction de la surface de la concession; l'infiltration est prise égale à l'exhaure minière. A partir de ces données, nous avons tenté de calculer le ruissellement et éventuellement le volume excédentaire ou déficitaire :

$$R+V = P-ETR-I$$

Les résultats sont les suivants:

-Calcul de la surface des différentes concessions et du volume annuel d'infiltration:

$$P-ETR = 800 - 580 = 220 \text{ mm / an / m}^2$$

-Montrambert:  $3 \text{ km}^2$

$$P-ETR = 220 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^6 = 660 \text{ m}^3 / \text{an}$$

$$P-ETR = 1808 \text{ m}^3 / \text{j} \quad (\text{volume moyen d'exhaure : } I = 1700 \text{ m}^3/\text{j})$$

$$V+R = 108 \text{ m}^3 / \text{j}$$

-Beraudière:  $2.2 \text{ km}^2$

$$P-ETR = 220 \cdot 10^{-3} \times 2.18 \cdot 10^6 = 479.6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$P-ETR = 1313 \text{ m}^3 / \text{j} \quad (I = 1000 \text{ m}^3/\text{j})$$

$$P-ETR = 1005 \text{ m}^3 / \text{j} \quad (\text{si l'on ne tient pas compte des travaux se situant sur le versant stéphanois})$$

$$V+R = 5 \text{ m}^3 / \text{j}$$

-Malafolie: 2.3 km<sup>2</sup>

$$P\text{-ETR} = 220 \cdot 10^{-3} \times 2.27 \cdot 10^6 = 499.4 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$P\text{-ETR} = 1368 \text{ m}^3 / \text{j}$$

-Varenne (total): 3.5 km<sup>2</sup>

$$P\text{-ETR} = 220 \cdot 10^{-3} \times 3.46 \cdot 10^6 = 762 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$P\text{-ETR} = 2086 \text{ m}^3 / \text{j}$$

-total Malafolie + Varenne

$$P\text{-ETR} = 3454 \text{ m}^3 / \text{j} \quad (I = 3500 \text{ m}^3/\text{j})$$

$$V+R = 50 \text{ m}^3/\text{j}$$

-Roche-la-Molière: 5.4 km<sup>2</sup>

$$P\text{-ETR} = 220 \cdot 10^{-3} \times 5.4 \cdot 10^6 = 1188 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$P\text{-ETR} = 3254 \text{ m}^3 / \text{j} \quad (I = 3000 \text{ m}^3/\text{j})$$

$$V+R = 254 \text{ m}^3 / \text{j}$$

On remarque donc la disproportion existante entre ces volumes résiduels et les volumes de transit total.

#### II-2-5: Interprétation des résultats

Tenant compte du fait que le secteur étudié couvre en partie les deux bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron, un premier bilan général a été fait, englobant ces deux versants.

Ce bilan a montré l'importance du ruissellement sur le secteur (70% pluie efficace) et pour le reste l'importance des infiltrations dans la nappe aquifère des terrains houillers exploités (30% du restant alors que la surface ne représente que le dixième du bassin versant).

Il apparait donc dans cette première estimation, comme il fallait s'y attendre, que l'infiltration est beaucoup plus importante à l'aplomb des travaux.

Afin de mieux connaître la part de l'infiltration sur les zones exploitées, nous avons donc effectué un bilan par concession.

Ce bilan montre que le ruissellement est très faible à l'aplomb des terrains exploités, en effet, les volumes exhaurés (pluie infiltrée), sont pratiquement égaux pour toutes les concessions, à la valeur calculée P-ETR. Le calcul de la différence P-ETR-I montre que le ruissellement est légèrement plus important pour les concessions urbanisées (Montrambert et Roche-la-Molière).

Sur le terrain, l'absence de ruissellement à l'aplomb des terrains exploités se matérialise par une mise en canalisation presque systématique de tout le réseau hydrographique de surface, afin d'éviter son infiltration dans les travaux sous-jacents.

D'autre part, les visites effectuées dans la mine, notamment au contact entre les micaschistes des monts du Pilat et les terrains houillers exploités, ont permis de constater que les apports latéraux en provenance des monts du Pilat sont très faibles.

### III - Essai de localisation des zones possibles d'émergence d'eau de mine.

#### III-1 - Définitions, rappels, sites d'émergence privilégiés.

Rappelons que le but de ce travail est de déterminer l'influence de l'arrêt de l'exhaure minière dans les concessions de la vallée de l'Ondaine et du Lizeron.

Dans ce but, les chapitres précédents ont permis d'appréhender l'hydrodynamique des zones exploités, les résultats obtenus montrent que les différentes concessions se comportent comme une ou plusieurs "nappes libres de fissure", limitées par des zones pratiquement imperméables correspondant à des failles ou à des terrains non exploités et pouvant éventuellement communiquer entre elles. La géométrie de cet ensemble est décrite dans le chapitre précédent.

Le bilan en eau a montré que l'alimentation de ce (ou ces) réservoir(s) se fait essentiellement depuis la surface par infiltration de la pluie efficace avec une particularité concernant l'absence pratiquement totale de ruissellement sur les secteurs exploités.

Compte tenu de ces résultats, et des observations faites sur le secteur de Saint-Etienne (où l'arrêt de l'exhaure est effectif depuis une dizaine d'années), la principale conséquence de l'arrêt de l'exhaure minière devrait se caractériser par une montée du niveau de l'eau dans les travaux jusqu'alors dénoyés pour les besoins de l'exploitation, sous l'influence de l'apport pluviométrique saisonnier, et ceci jusqu'à ce que l'eau trouve un ou plusieurs exutoires permettant d'équilibrer les flux entrant et sortant du (des) réservoir(s).

L'évacuation du "trop-plein" ne pouvant se faire latéralement puisque les terrains voisins sont imperméables, elle se fera donc en surface comme cela a déjà été le cas sur le secteur stéphanois.

Il est alors prévisible que les zones privilégiées d'émergence se situeront dans les points bas de l'intersection de la topographie et du pourtour du (des) réservoir(s); soit en général dans les vallées correspondant aux cours d'eau.

Dans ces zones que nous dirons "critiques", certaines anisotropies locales des terrains superficiels peuvent faciliter le transfert de l'eau vers l'extérieur : les observations faites sur la ville de Saint-Etienne mettent particulièrement en évidence l'importance des "fendues", qui sont des galeries inclinées utilisées lors de l'exploitation des couches de charbon proches de la surface, et assurent la liaison entre les travaux et le jour.

Lorsque le niveau de l'eau arrive dans ces travaux superficiels, la "fendue" se comporte comme un drain, et permet l'évacuation des eaux vers l'extérieur.

Evidemment, sur notre secteur, les couches superficielles n'ont pas été exploitées récemment, et les fendues existantes sont souvent remblayées, mais, les matériaux utilisés pour le remblai de ce genre de galeries sont souvent grossiers : il en résulte que l'anisotropie de perméabilité demeure, même si la fendue n'est plus visible en surface.

Cette constatation concernant l'importance des fendues nous a amenés à effectuer des recherches dans les archives des houillères afin de localiser les fendues existant dans les zones jugées vulnérables.

Parmi les autres facteurs qui peuvent influencer l'apparition des émergences, en particulier les zones de faille qui jouent parfois localement

un rôle de barrage pour les écoulements hydrodynamiques ou bien provoquer le colmatage des galeries qui les traversent ; une partie du système peut se trouver isolée derrière de tels barrages, l'exutoire se situe alors le long de la faille qui, de plus, correspond souvent en surface à un secteur d'érosion privilégié, donc à un point bas.

Le dernier critère retenu pour déterminer les zones "critiques" concerne l'état des liaisons existant entre les différentes concessions du système : si toutes les communications étaient ouvertes, le système serait unitaire et ne posséderait qu'un point bas, si par contre, toutes les concessions étaient isolées, il faudrait définir une zone vulnérable par concession.

Ce critère nécessite la mise au point de différentes hypothèses concernant les communications existantes, ainsi qu'une étude approfondie des différentes concessions, tant au niveau de la localisation des travaux, qu'au niveau de la topographie, etc....

Les zones d'émergence possible étant définies, il est ensuite nécessaire de déduire leurs nuisances éventuelles (notamment vis-à-vis de l'urbanisme), de déterminer sous quelles conditions on peut laisser apparaître l'émergence, ou de proposer une solution optimale de pompage pour empêcher son apparition.

\*Remarque : si l'on applique à la zone de Saint-Etienne les différents critères précédemment définis pour déterminer les zones critiques, cela permet de retrouver 80% des émergences connues sur ce secteur.

L'expérience montre qu'il n'y a pas de gros problèmes liés à l'apparition d'eau de mine en surface, si la topographie est bien marquée ; à l'inverse, dans les zones très urbanisées, les cours d'eau peuvent être canalisés, les vallées remblayées ; dans ce cas, il n'y a plus de point bas et l'émergence se fait de façon diffuse par affleurement de la nappe dans des secteurs caractérisés par des surcreusements (caves, fosses,...etc...)

### III-2 - COMPORTEMENT HYDRAULIQUE POSSIBLE DES DIFFERENTES ZONES EXPLOITEES

Rappelons tout d'abord quelles sont les différentes parties du système hydrogéologique constitué par les terrains exploités :(annexe n°1).

- Division de la Tour
- Division de Malafolie

- Division de Varenne
- Division de Roche-la-Molière
- Concession de Montrambert
- Concession de la Beraudière

Le manque de connaissances concernant l'état des communications entre les différentes zones exploitées tenait, au début de ce travail, au fait que dans la plupart des cas, le niveau d'eau avant arrêt de l'exhaure était maintenu en dessous de ces communications (figure n°2-5); ce qui nous a conduits à avancer des hypothèses concernant l'état de ces communications selon un schéma de vases communicants.

III-2-1 - Première hypothèse : toutes les zones exploitées communiquent de façon idéale (i.e.:si l'ensemble des concessions peut être considéré comme un système aquifère unique):

Dans l'hypothèse où chaque zone communique avec sa voisine de façon idéale le problème est ramené à un système simple de vases communicants ; les émergences se situeraient donc au point le plus bas, c'est-à-dire au niveau de la vallée de l'Ondaine dans la division de la Tour à la cote + 446 (figure n°2-3).

III-2-2 - Deuxième hypothèse : la faille du Breuil séparant les divisions de la Tour et de Malafolie ne permet pas les communications.

Il semble que la faille du Breuil, qui sépare la division de la Tour de celle de Malafolie, n'ait été traversée par aucun travaux ; il paraît donc probable qu'il n'y ait aucune communication entre ces deux divisions.

Dans ce cas, la division de la Tour est isolée et conserve son exutoire alors que l'exutoire naturel de notre système se situe dans la vallée de l'Ondaine à la cote + 456 au niveau de la division de Malafolie (figure n°2-3).

III-2-3 - Troisième hypothèse : colmatage des communications reliant la concession de Montrambert et la division de Varenne.

La liaison Varenne-Montrambert se fait par deux galeries au rocher (figure n°2-3) partant de la division de Varenne à la cote - 136 et

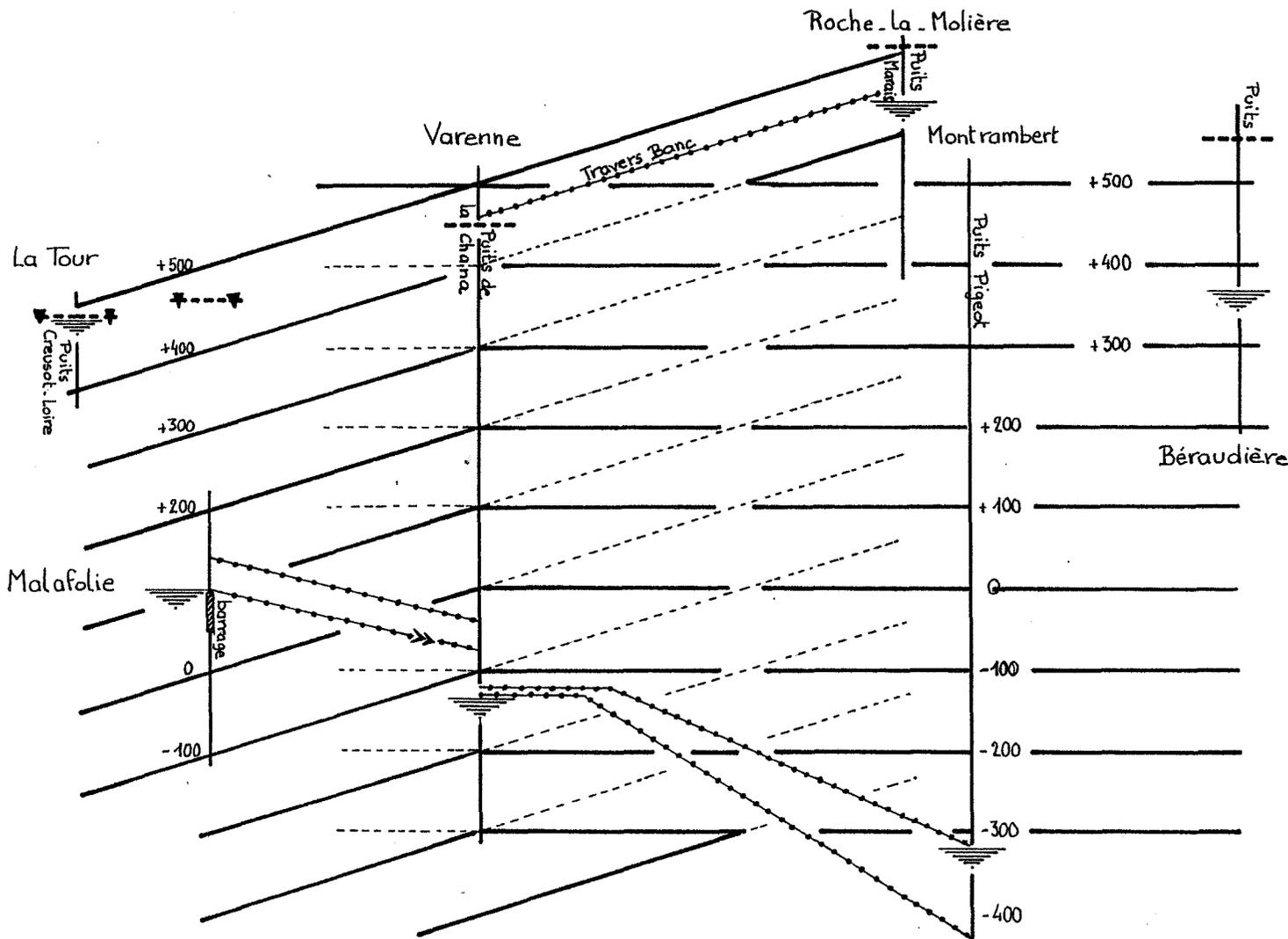
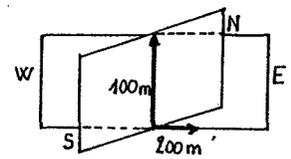


FIGURE N°2-5

- ..... communications
- - - - - cote de résurgence probable
- ≡ niveau d'eau
- ▼ cote d'alerte

70



NIVEAU D'EAU AVANT ARRÊT DE L'EXHAURE DANS CHAQUE DIVISION

arrivant à celle de Montrambert aux cotes -320 et -420 ; dans un cas de communications idéales, ces deux galeries devraient permettre aux eaux accumulées dans le secteur de Montrambert de s'équilibrer avec le secteur de Varenne puis de Firminy pour rejoindre l'Ondaine.

Si ces deux galeries se colmatent et deviennent insuffisantes pour assurer le transfert, il se créera un exutoire nouveau dans la concession de Montrambert. Le point de d'émergence possible se situerait au Chambon-Feugerolles dans la vallée de l'Ondaine ; il serait à la cote + 496.

III-2-4 - Quatrième hypothèse : communication mauvaise entre les divisions de Roche-la-Molière et de Varenne.

Il existe deux communications entre les divisions de Roche-la-Molière et de Varenne : la première, à la cote + 11 est obstruée par un serrement, la deuxième à la cote + 455 (travers-banc Bouchetière) est ouverte ; toutefois avant l'arrêt de l'exhaure elle était exondée grâce au pompage du puits du Marais de Roche-la-Molière qui maintenait l'eau dans cette division à la cote + 430.

Après arrêt des pompes, il était prévisible que le travers banc Bouchetière ne permette pas l'évacuation des eaux de la division de Roche-la-Molière vers celle de Varenne (le déficit de pression de 23 bars (figure n°2-7) au serrement existant à la cote + 11 était révélateur d'une mauvaise communication avec la division de Roche-la-Molière : faille de Dourdel-Montsalson?) ; on pouvait donc penser que le niveau d'eau continuerait à monter dans la division de Roche-la-Molière pour trouver un exutoire au point le plus bas ; c'est-à-dire dans la vallée du Lizeron à l'aval des Rieux à la cote + 500.

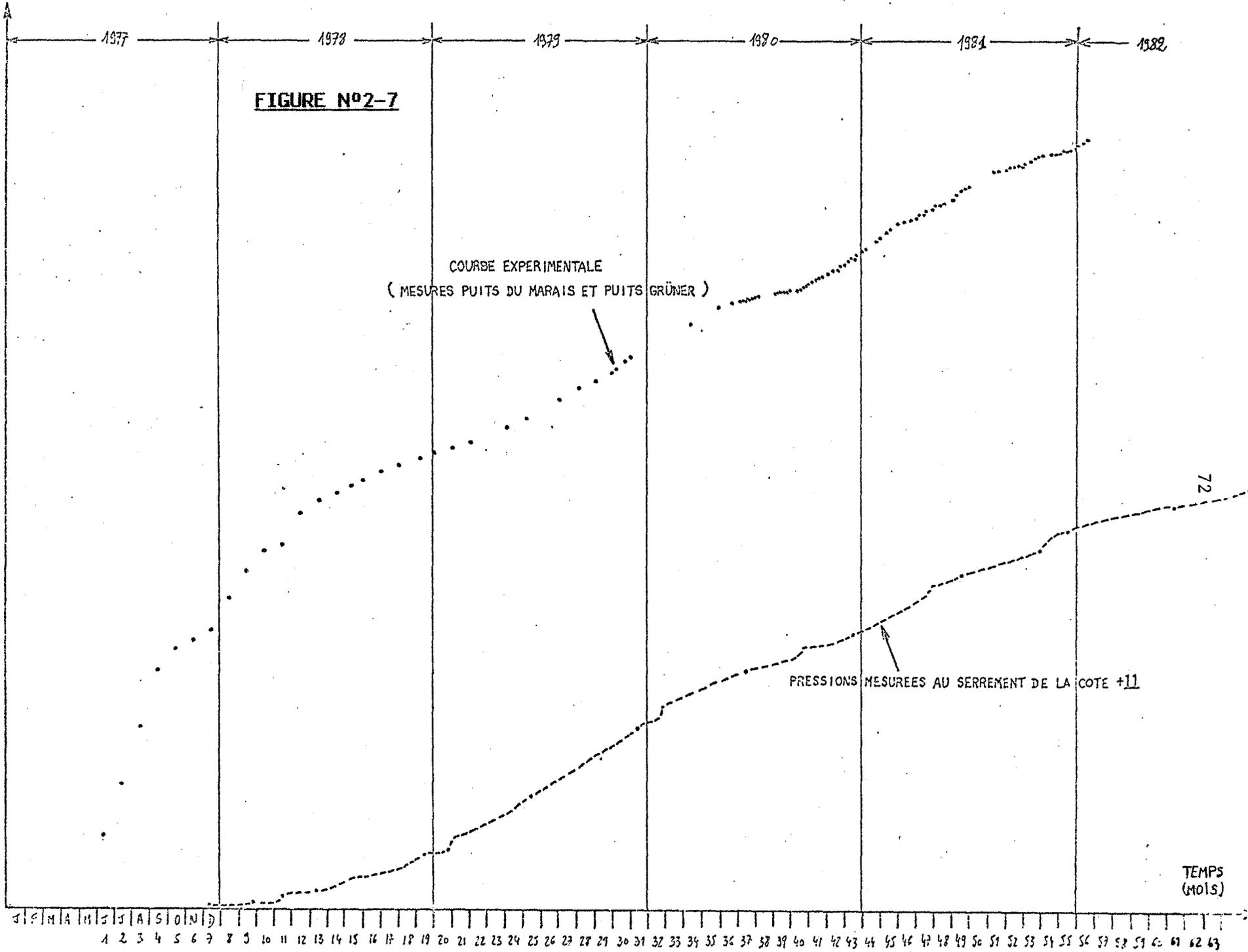
Si les écoulements souterrains rencontrent une certaine résistance à resurgir dans cette zone où les travaux ne communiquent pas directement avec la surface, il est possible que divers exutoires supplémentaires apparaissent dans la vallée du Lizeron ; là où les travaux sont proches de la surface (zone de la ferme des Rieux par exemple).

III-2-5 - Cinquième hypothèse : colmatage des galeries traversant la faille de Platon.

Il est possible que le déficit de pression relevé au serrement de la cote 11 résulte du colmatage des galeries traversant la faille de Dourdel-

HAUTEURS PIEZOMETRIQUES  
(METRES)  
ET  
PRESSIONS EN BARS X 10

- 430
- 420
- 410
- 400
- 390
- 380
- 370
- 360
- 350
- 340
- 330
- 320
- 310
- 300
- 290
- 280
- 270
- 260
- 250
- 240
- 230
- 220
- 210
- 200
- 190
- 180
- 170
- 160
- 150
- 140
- 130
- 120
- 110
- 100
- 90
- 80
- 70
- 60
- 50
- 40
- 30
- 20
- 10



1977

1978

1979

1980

1981

1982

J F M A M J J A S O N D  
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63

Montsalson (ce qui correspondrait à l'hypothèse faite au paragraphe précédent) mais il peut également résulter de l'influence de la faille de Platon (figure n°2-3).

Dans ce cas, la division de Varenne se verrait séparée en deux zones : la zone Varenne sud en communication franche avec la division de MALAFOLIE, ce qui nous autorise à ne pas envisager l'hypothèse du colmatage de la faille des 3 ponts (cote + 100 avec barrage et cote + 140) et la zone VARENNE nord totalement isolée du reste.

Dans ce cas, l'exutoire de ce petit réservoir de Varenne nord devrait se situer à la naissance des vallées de la Roare et du Péchier, à des altitudes de l'ordre de 530 m.

Deux situations peuvent être envisagées dans cette hypothèse :

- le secteur de Varenne nord est indépendant à la fois de celui de Roche-la-Molière et de celui de Varenne sud ; dans ce cas l'arrêt des pompes dans l'une ou l'autre de ces zones n'aurait aucune influence particulière sur lui.

- le secteur de Varenne nord n'est pas vraiment isolé de celui de Roche-la-Molière ; le travers-banc Bouchetière peut alors évacuer les eaux en direction du Lizeron via les travaux de Roche-la-Molière.

III-2-6 - Sixième hypothèse : pas de communications au travers de la faille des Maures.

La concession de la Béraudière est peut être celle qui pose le plus de problèmes.

Il semble que les travaux de cette concession ne communiquent avec ceux de la concession de Montrambert que par une galerie de la cote + 356 sur laquelle existe un serrement très ancien (1893).

En effet les exploitations se sont arrêtées de part et d'autre de la faille des Maures (presque horizontale) et à l'ouest de celle-ci elles se superposent sans communiquer (figure n°2-8).

Cette faille des Maures semble effectivement créer un barrage efficace puisque le niveau d'eau étant stabilisé côté Béraudière à la cote + 356, avant arrêt de l'exhaure, aucun apport d'eau préférentiel en provenance de la

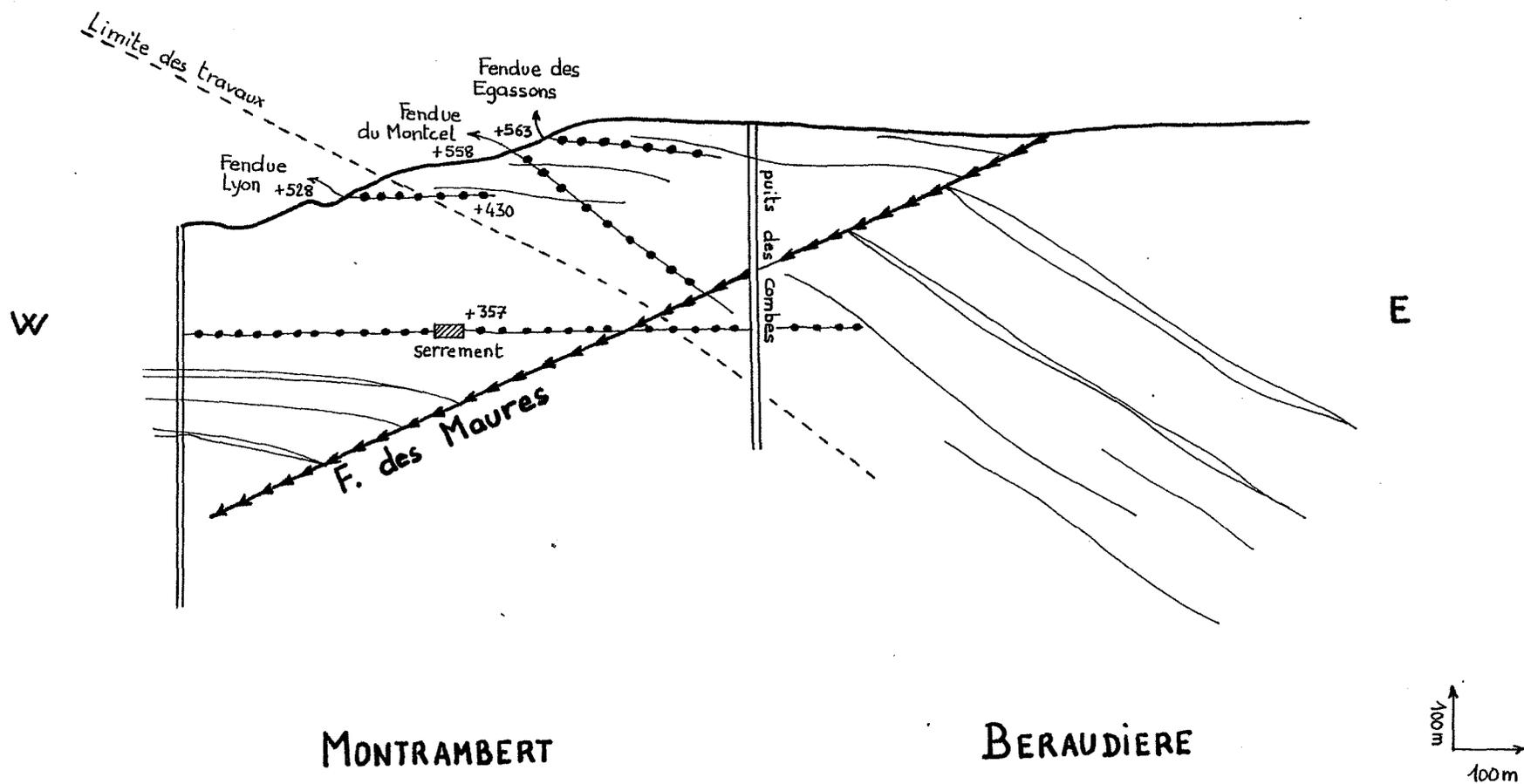


FIGURE N°2-8

SCHEMA DES RELATIONS ENTRE LES CONCESSIONS DE MONTRAMBERT ET LA BERAUDIÈRE

COUPE EST-OUEST

Hypothèses n°	0 à 10 Coefficient de crédibilité	Enoncé	Localisation des zones vulnérables	cote d'émergence	cotes critiques
1	0,1	Toutes les concession communiquent entre elles	300 mètres en amont du pont du Sauze dans l'Ondaine(Unieux)	446,6	450
2	9	Pas de communication Malafolie-la Tour	Idem n°1 + Ondaine Firminy Impasse du Lavoir	456,6	460. (Souterrain A47)
3	0,5	n°2.+ Pas de communication Montrambert-Varenne	Idem n°2 + Ondaine Chambon- Feugerolles (piscine)	496,4	497,4
4	5	n°3 + Pas de communication Roche - Varenne	Idem n°3 + Vallées du Lizeron et du Pêchier (Roche)	486,4 à 500	505 (station d'épuration)
5	4	Pas de communication Varenne nord-sud	Idem n°4 + hautes vallées du Pêchier et de la Roare	536 à 543	
6	6	n°4 + Pas de communication Montrambert-Beraudière	Fendues (Lyon, Montcel, Egassons)	528 à 567	563,7 (cité Delaynaud)
6'	9,5	Pas de communication Varenne est-ouest	Vallon Zone Industrielle Chauvetière	567	

**FIGURE N°2-6** : Tableau récapitulatif des différentes hypothèses

Béraudière n'a été constaté au sein des derniers travaux réalisés sis à un kilomètre de là dans la concession de Montrambert.

Il existe, à la cote + 430, une galerie partant d'anciennes exploitations de la Béraudière et rejoignant une fendue arrivant au jour sur le secteur de Montrambert à la cote + 528 (fendue Lyon). Cette galerie n'est pas en communication avec les travaux de Montrambert.

En cas de l'arrêt du pompage du puits des Combes la fendue de LYON serait donc le point de résurgence possible le plus bas. Cependant, il s'agit là de travaux anciens dont le colmatage est probable dans la mesure où ils débouchent sous des bassins à "schlam".

Dans ce cas, un second point de résurgence se situerait au niveau de la fendue du Montcel qui arrive au jour à la cote + 558, ou bien de la fendue des Egassons (cote 563,7).

Si ces deux émergences sont suffisantes pour évacuer les eaux de la Béraudière, il ne devrait pas y avoir de problème sur le quartier de Bellevue à Saint-Etienne dont le point bas semble se situer aux environs de la gare SNCF de Bellevue à la cote + 566. Sinon, cette dernière devrait être rajoutée à la liste des diverses zones vulnérables possibles.

### III-3 - ETUDE DETAILLEE DES DIFFERENTES CONCESSIONS ET DE LEURS ZONES VULNERABLES

#### III-3-1 - Introduction

Afin de bien appréhender les conséquences de l'apparition d'une émergence dans les différents sites précédemment définis sur des hypothèses ne faisant pas appel à une connaissance particulière du terrain (tableau n°2-6), il était indispensable de bien connaître les concessions dans lesquelles ils se situent pour confirmer ou infirmer certaines de ces hypothèses.

Pour cela, de nombreuses visites sur le terrain ont été effectuées. Ces visites accompagnées d'une bonne connaissance de la topographie (campagne IGN 1983), des fendues existantes (Archives H.B.L.), de l'urbanisme (P.O.S.) et de la localisation des travaux vont permettre de déterminer une stratégie de surveillance du système tout au long de la remontée du niveau d'eau, et particulièrement sur la fin de l'expérience.

### III-3-2- Division de La Tour

La division de la Tour représente la zone topographiquement la moins élevée du système, c'est la raison pour laquelle c'est ici que se situerait la zone d'émergence si chaque concession communiquait effectivement avec la voisine.

La cote critique déterminée au paragraphe précédent serait donc de 446 mètres, correspondant au point bas de la Division situé dans le lit de l'Ondaine à la limite entre les communes de Firminy et Unieux (carte n°2-9).

Si les eaux de toutes les concessions venaient se déverser dans cette zone, le débit des émergences devrait être important (de l'ordre de 10.000 m<sup>3</sup>/j soit 116 l/s), et le risque serait grand car la Division de La Tour se situe en zone urbaine, dans un secteur où la topographie n'est pas très contrastée.

Les enquêtes menées ont montré que le projet d'extension de l'autoroute A47 en direction du Puy, passe en souterrain au niveau de la rue DORIAN à Firminy (communication C.E.T.E. Lyon) au dessus d'un collecteur d'égoûts situé à la cote +451 et représente le point vulnérable le plus bas dans la zone d'influence des travaux.

La zone de la Division de La Tour ne subit plus actuellement d'effondrements liés aux travaux (carte des zones d'effondrement minier E.P.U.R.E.S., G.E.P.).

Les dernières exploitations datent de 1919 et ont été effectuées au puits Lachaux. Les travaux se situent entre la cote +200 m et le jour dans le faisceau Grüner (3<sup>ème</sup> à 8<sup>ème</sup> Grüner).

---

#### Remarque:

Tous les points de nivellement cités sont issus de la campagne I.G.N. 1983. Certains cheminements particuliers ont été effectués à notre demande par les géomètres du service des domaines des Houillères de la LOIRE en tenant compte de cette même campagne de 1983.

Compte tenu de l'ancienneté de la division, de la présence de la faille du Bréuil la séparant de celle de Malafolie, et de divers autres arguments énoncés ci-dessous nous pouvons considérer à l'heure actuelle que la Division de La Tour est isolée du reste du système, en effet:

-1- Le bilan en eau effectué au chapitre II montre que le puits de la Chana (Division de Varenne) qui est le seul puits minier qui aurait été susceptible d'assurer l'exhaure pour la division de La Tour, pompait (avant arrêt de l'exhaure) un volume d'eau correspondant à l'infiltration des seules divisions de Varenne et de Malafolie.

-2- Les archives Géologiques des Houillères de la Loire n'ont révélé aucune communication entre les bassins de La Tour et de Malafolie.

-3- L'usine Creusot-Loire-Ondaine possède un puits dans la division La Tour (Puits Cylindre United) (carte n°2-9). Le niveau de l'eau dans ce puits est à la cote +446, soit sensiblement le niveau de l'Ondaine alors que le niveau dans la division de Malafolie est maintenu à la cote +100. Le volume moyen d'exhaure est de  $32.5 \text{ m}^3/\text{j}$

-4- Des visites sur le terrain ont permis la découverte d'une émergence dans le lit de l'Ondaine, se situant exactement dans la zone jugée vulnérable pour la Division de La Tour, soit à la limite des communes de Firminy et Unieux, 300 mètres environ en amont du Pont de Sauze (carte n°2-9).

Les eaux de cette émergence présentent exactement les caractéristiques chimiques d'une émergence "minière" (3<sup>ème</sup> partie) tant au niveau de la température ( $15^\circ\text{C}$ ), du pH, que des matériaux qu'elle dépose sur son passage (dépôt brun ocre caractéristique).

Son débit a été estimé à 4 l/s soit environ  $340 \text{ m}^3/\text{j}$  s'écoulant de façon diffuse sur une centaine de mètres dans le lit de la rivière.

Ce volume ajouté à celui exhauré par l'usine Creusot-Loire représente quelques  $370 \text{ m}^3/\text{j}$ , sachant que le volume journalier infiltré sur la division est de  $425 \text{ m}^3/\text{j}$ , il y a tout lieu de penser qu'il s'agit là de la principale émergence de la nappe contenue dans l'ancienne division de La Tour qui aurait donc retrouvé un équilibre naturel depuis l'arrêt de l'exploitation.

Le niveau moyen de cette nappe est celui de l'émergence (447 m.), on le retrouve dans le piézomètre implanté dans l'usine Creusot-Loire (447,5 m.) ainsi que dans deux puits situés dans le même secteur.

Notons que l'émergence doit exister depuis de très nombreuses années, sans que personne n'en ait jamais relevé l'existence, prouvant ainsi qu'une venue d'eau de mine, apparaissant dans le lit d'une rivière ne présente que très peu de nuisances. Des analyses chimiques faites dans l'ondaine à l'étiage en amont et en aval de cette émergence ne montrent qu'une très faible influence qualitative.

### III-3-3 - La division de Malafolie

Elle s'étend sur toute sa surface sous la ville de Firminy. La topographie est assez contrastée +505,9 m. au point le plus haut, +456,6 m. au point le plus bas (Ondaine) ; la zone est stabilisée : il n'y a plus d'effondrements liés aux travaux.

Les dernières exploitations effectuées dans la concession datent de l'année 1961, depuis, l'exhaure a été assuré par l'intermédiaire du puits de la Chana dans la division de Varenne (niveau de l'eau maintenu à la cote +100 m.), il existe en effet de nombreuses communications entre ces deux zones de travaux, ce qui nous autorise à ne pas envisager l'hypothèse d'une séparation entre ces deux divisions.

Les couches exploitées appartiennent au faisceau Gruner (2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> Gruner) et Beaubrun (3<sup>ème</sup> à 13<sup>ème</sup> Beaubrun). Le niveau le plus bas atteint par les travaux est à la cote -20m et certaines couches ont été exploitées jusqu'à la surface.

Les affleurements se situent plutôt au Sud-Ouest de la Division; cependant aucune fendue n'a été relevée dans les zones jugées vulnérables (figure n°2-10).

L'exutoire possible de la Division se situe au niveau de l'Ondaine dans le quartier des abattoirs à Firminy (+456.6m). Les visites sur le terrain ont montré que le secteur est très urbanisé, ce qui présente un inconvénient notable compte tenu de l'agressivité éventuelle des eaux de mine vis-à-vis des bétons. Cependant, dans le secteur, la rivière est très nettement encaissée par rapport aux habitations alentours (4 à 5m en dessous des fondations des maisons les plus proches).

Il existe dans la division de Malafolie un passage en souterrain

de l'autoroute A47 au niveau de l'église du MAS à Firminy. Le radier de ce tunnel est signalé dans les dossiers à la cote 456m, soit à peu de choses près le niveau de l'Ondaine.

L'étude du dossier de reconnaissance relatif à la construction de cet ouvrage (D.D.E Loire) montre qu'il existe dans le secteur une nappe captive dans le houiller, sous des terrains sédimentaires et des roches altérées peu perméables.

Cette nappe présente une niveau piézométrique moyen à 2 mètres sous la surface du sol (cote 459m) plus élevé à l'est et au sud ce qui peut être dû à un effet de drainage de l'aquifère par la voie S.N.C.F. longeant le nord du tracé.

Le soutènement de la partie couverte a donc été prévu en conséquence:

- Au sud, une paroi moulée fichée de 2.30m sous le fond de décaissement et dans laquelle on a pris la précaution de laisser des tubes en attente aux extrémités de panneaux pour pouvoir éventuellement réaliser des injections sous le pied de paroi.

- Au nord, un soutènement "berlinois".

- La couche de forme est prévue pour assurer le drainage des eaux d'infiltration avec récupération de ces eaux à l'aide de drains en pied de paroi pour leur évacuation vers un collecteur central.

L'évacuation des eaux recueillies à l'extrémité de la partie couverte se fait par un bassin de captage avec pompage automatique vers l'extérieur.

Aucune donnée concernant la quantité d'eau recueillie n'a pu être obtenue, cependant une visite dans la salle des pompes nous permet d'estimer un débit d'exhaure (non lié au ruissellement) de l'ordre de 50 l/h au maximum ce qui laisse présager que l'aquifère est de faible perméabilité.

D'autre part, des essais effectués sur le piézomètre implanté à la gare de Firminy (à 50m du souterrain) montrent aussi des perméabilités très faibles ; le niveau de l'eau au repos dans ce piézomètre se situe à 3 mètres sous le sol, soit à une cote semblable à celle relevée pour cette nappe lors de la construction de l'autoroute.

En conclusion, ce souterrain est construit dans une nappe aquifère superficielle dont le niveau moyen est à la cote 459 et dont la

perméabilité est très faible.

Lors de la remontée du niveau d'eau, la nappe d'eau profonde devrait trouver un exutoire à la cote 456, soit 3 m. plus bas que le niveau de base de la nappe superficielle; il y a donc, a priori, aucune raison pour que la remontée de l'aquifère minier vienne perturber le drainage actuel du radier de l'autoroute.

Si toutefois le niveau de l'eau de mine atteignait la cote 459 (hypothèse peu probable, compte tenu de l'existence de toute une zone basse dans le cours d'eau), le débit d'infiltration ne pourrait en aucun cas être supérieur au débit actuel étant donné la faible perméabilité des terrains.

Les eaux résultant alors d'un mélange entre les eaux superficielles et les eaux de mine ne devraient pas être dangereuses pour les bétons en place, choisis (en connaissance de cause) pour leur résistance vis-à-vis de l'agressivité des eaux souterraines.

#### III-3-4- Division de Varenne

La division de Varenne est un secteur qu'il est difficile d'isoler du reste du système. Elle présente cependant la particularité d'avoir une petite zone de travaux apparemment isolés formant un système indépendant pour lequel il est nécessaire de prévoir une zone d'émergence.

Cette division constitue la zone centrale de tout le système précédemment défini (figure n°2-3), elle est en communication au nord avec Roche-la-Molière, à l'ouest avec Montrambert et au Sud avec Malafolie.

Elle est divisée en deux par le passage de la faille du Platon, faille normale de direction Est-Ouest, abaissant le compartiment nord par rapport au compartiment sud d'une centaine de mètres.

Les principales couches exploitées appartiennent aux faisceaux des Littes et de Beaubrun, et les exploitations sont réparties entre la cote -384 et la surface.

Au sud de la faille du Platon, le pendage des couches est plutôt dirigé vers le sud et le sud-est; au nord, le pendage est dirigé vers l'est si bien que l'on retrouve les couches de charbon à l'affleurement vers l'ouest.

La topographie de cette division est relativement contrastée, elle est drainée en surface par l'Egotay dont le parcours se situe à l'aplomb de la faille du Platon et au nord par le départ des vallons du Péchier et de la Roare.

Les derniers travaux au fond datent de 1974. Depuis, l'exhaure a continué d'être assurée jusqu'en 1983 compte tenu des communications existant avec les derniers travaux en cours dans la concession de Montrambert, et de leur proximité (annexe n°1).

L'exhaure se faisait par le puits de la Chana où le niveau de l'eau était maintenu à la cote -136 et qui recevait les eaux collectées dans la division de Malafolie où elles étaient retenues à la cote +100 puis dirigées sur Varenne (Figure n°2-5).

Compte tenu de cette disposition, on ne peut pas mettre en doute les communications existant entre Varenne-Sud et Malafolie, le point le plus bas de cette unité se situant donc dans la division de Malafolie tel qu'il a été décrit au paragraphe précédent.

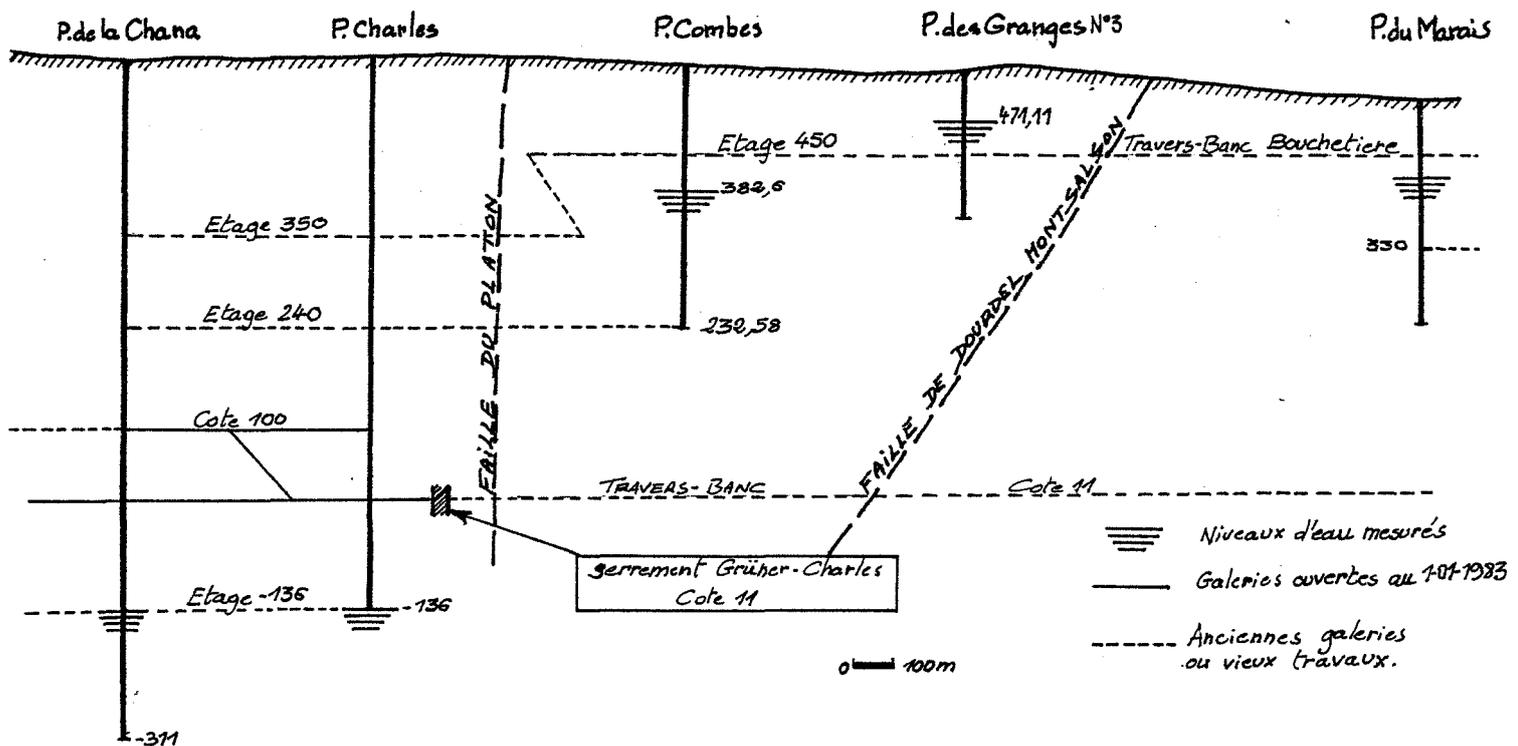
Dans ces conditions, il n'est pas nécessaire de définir une zone vulnérable au sud de la division de Varenne.

Rappelons que parmi les différentes hypothèses émises au Chapitre III, il y avait celle du colmatage des galeries traversant la faille du Platon, basée sur l'observation d'un déficit de pression au "serrement" du "travers-banc" à la cote +11 (reliant les divisions de Roche-la-Molière et de Varenne) par rapport à la remontée du niveau d'eau dans la division de Roche-la-Molière lors de l'expérience de 1977 (figure n°2-7).

Sachant que ce travers-banc traverse la faille de Dourdel-Montsalson et celle du Platon, ce déficit de pression peut s'expliquer par des pertes de charge anormales dans cette galerie liées à des éboulements au niveau des failles.

Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, nous avons effectué des mesures piézométriques dans des puits non remblayés de la division de Varenne-nord (puits des Granges n° 3 et puits Combes).

Les premières mesures effectuées donnaient au mois d'avril 1983 (quatre mois après arrêt de l'exhaure) le schéma suivant:



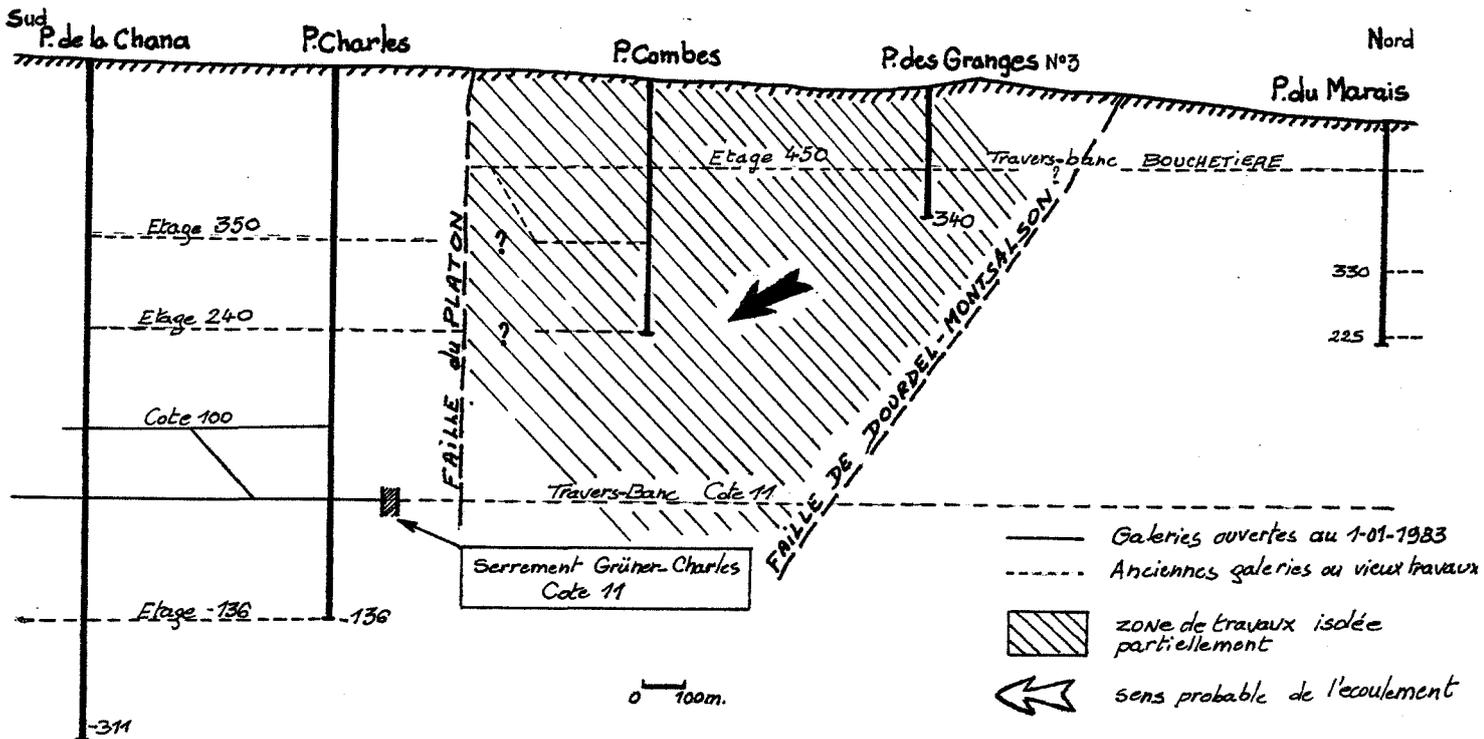
L'interprétation de ces premières données suggère, d'une part, que l'influence du pompage au puits de la Chana (avant arrêt de l'exhaure) n'atteignait pas ces deux puits.

D'autre part, le travers-banc Bouchetière passe par des travaux en relation directe avec le puits des Granges n°3. Il aurait donc été logique, si ce travers-banc n'avait pas été colmaté, que l'eau contenue dans les travaux du puits des Granges à la cote +471 se déverse par son intermédiaire dans les travaux de Roche-la-Molière où le niveau de l'eau était, au moment de ces mesures, moins élevé.

On pouvait donc d'ores et déjà supposer, dès les premières mesures, que le travers-banc Bouchetière était colmaté. Hypothèse confirmée par les mesures suivantes, où apparaît une inversion du gradient entre le puits des Granges n°3 et le puits du Marais, dans lequel le niveau de l'eau est monté au dessus de la cote du Travers-banc Bouchetière, sans que l'on constate d'inflexion sur la courbe de remontée au passage de cette cote.

Un autre élément permet d'émettre une hypothèse concernant l'état d'isolement de la zone de travaux de Varenne nord : il s'agit de la relative stabilité du niveau de l'eau suivi dans le puits des Granges n°3 depuis l'arrêt de l'exhaure. En effet, si la zone de travaux est effectivement isolée du reste du système, le niveau de l'eau devrait monter sous l'influence des apports liés à la pluviométrie.

Il s'agit donc soit d'une anomalie localisée uniquement dans les puits, soit d'un isolement partiel des travaux aux alentours du puits des Granges n° 3 et du puits Combes par effondrement de certaines galeries et certains travaux au niveau des failles qui ne permettent qu'un passage très lent de l'eau vers les travaux adjacents ; les niveaux d'eau dans les deux puits laissent présager un gradient d'écoulement allant plutôt vers les travaux situés plus au sud (division de Varenne) (figure n°2-12 ).



En tout état de cause, si la zone de travaux est isolée, il est nécessaire de déterminer la zone d'émergence possible. Le site vulnérable, point bas du secteur, se situerait dans la zone des affleurements localisés dans les hautes vallées du Péchier et de la Roarç, soit entre les cotes 543 et 538 où il existe de plus plusieurs fendues (carte n°2-11).

### III-3-5 - Division de Roche-la-Molière

Elle constitue l'extrémité nord de la zone d'étude, et se situe entièrement sur le bassin versant du Lizeron. Il s'agit d'une division qui, même si elle est isolée du reste des concessions, ne pose pas de grands problèmes dans la mesure où elle possède une zone basse bien définie, située en zone rurale et présentant de nombreux affleurements de charbon.

Les deux grands faisceaux principaux y ont été exploités depuis le moyen-âge et jusqu'en 1984 (dernières découvertes en cours), il s'agit des

faisceaux Beaubrun (3<sup>ème</sup> à 7<sup>ème</sup>-13<sup>ème</sup>) et Grüner (1<sup>ère</sup> à 8<sup>ème</sup>-13<sup>ème</sup>). Les travaux se répartissent depuis l'affleurement jusqu'à la cote -70 m..

Le pendage des couches est ENE, on les retrouve donc à l'affleurement dans leur partie WSW où elles ont été en grande partie exploitées par des fendues ou en découvertes.

Le secteur semble peu faillé, il est limité au sud par la faille de Dourdel-Montsalson séparant ces travaux de ceux de Varenne. On n'y constate plus en surface de dégâts liés aux exploitations souterraines qui ont cessé en 1959.

Deux travers-banc relie la division de Roche-la-Molière et celle de Varenne, l'un situé à la cote +11 m. est obstrué par un serrement, l'autre situé à la cote +455 est le Travers-Banc Bouchetière.

En surface, le secteur est drainé par le Péchier, la Pommaraise et le Pirafoy, qui s'écoulent vers le nord où ils confluent pour former le Lizeron s'écoulant vers l'Ouest et constituant le point bas de la Division.

Si le travers-banc bouchetière, de part son état, ne permet pas le déversement des eaux de la division vers le reste du système (comme nous permettent de le croire les argument énoncés dans le § précédent : division de Varenne), le système isolé de Roche-la-Molière devrait logiquement trouver un exutoire dans la vallée du Lizeron, entre le lieu dit "aux Rieux" et le pont du CD n°25 sur le Lizeron (cotes 490 m. à 500 m.).

La seule construction recensée sur le secteur est la ferme des Rieux appartenant aux Houillères et située sur une butte surplombant le lit de la rivière (notons qu'en cas de forte pluie il se produit des émergences temporaires dans le lit secondaire du ruisseau près de cette ferme).

D'autre part, comme nous l'avons signalé plus haut, les 3<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> Grüner affleurent largement dans cette zone, ce qui explique le nombre important de fendue relevées sur les plans des archives et reportées sur la figure n°2-13).

La fendue de Cote Chenet notamment, un peu plus récente que les autres (encore visible sur le terrain), sera à surveiller de la même façon que le lit du Lizeron. Les autres, essentiellement situées dans les vallées du Péchier

et du Lizeron, sont à une altitude légèrement plus élevée ; la probabilité de résurgence y apparaît plus faible, mais néanmoins elles pourraient être le siège d'émissions secondaires en cas de forte pluie.

Tous ces ouvrages débouchent au jour en zone rurale; il faut cependant porter une attention particulière à la station d'épuration des eaux de Roche-la-Molière, située au confluent du Pèchier, du Pommaraise et du Lizeron, et dont les fondations sont en ciment CPJ 45 (350 kg), soit un ciment Portland contenant 65% de Clinker et du laitier, ne résistant pas particulièrement aux eaux sursulfatées. La consultation des archives a permis de relever certaines fentes relativement proches de la station, ainsi qu'une galerie d'écoulement des eaux (cote 500), ces ouvrages ne sont plus visibles en surface et leur cote est plus élevée que celle de la ferme des Rieux ; les émergences devraient donc se situer en aval de cette zone.

En ce qui concerne le fonctionnement de la station d'épuration, l'apparition d'une résurgence en amont n'augmentera pas les débits à traiter dans la mesure où le Pèchier et la Pommaraise sont doublés d'une canalisation "eaux vannes" permettant un traitement séparatif ne comportant pas les eaux de ruissellement naturelles.

### III-3-6 - Concession de Montrambert

Située dans une zone à topographie bien marquée, et drainée en surface par un cours d'eau important, cette concession représente typiquement un secteur où le point bas se détermine sans ambiguïté dans le lit de la rivière.

La concession de Montrambert a été le siège des dernières exploitations souterraines pratiquées jusqu'en 1983 par le puits Pigeot (La Ricamarie).

Le nombre de couches exploitée dans la concession est très important, elles appartiennent aux faisceaux des Combes, des Littes, Beau brun et Gruner.

L'exploitation se situe sur la limite sud du Bassin Houiller (certaines galeries rentrent même dans les micaschistes du mont Pilat); les couches appartiennent au flanc sud d'un synclinal d'axe NNE, certaines d'entre elles affleurent au SSW dans des zones proches de la vallée de l'Ondaine.

Les travaux sont limités à l'est par la faille des Maures qui constitue la limite avec la concession de la Béraudière (annexe n°1).

Il existe deux travers-bancs au rocher assurant la communication avec les travaux de la division de Varenne. Actuellement, ces galeries relativement récentes sont encore ouvertes et permettent aux eaux de Varenne de venir combler le déficit piézométrique de la concession de Montrambert, quand le niveau sera le même dans les deux divisions, il est probable que le gradient s'inversera, et que les eaux de ces deux zones trouvent un exutoire dans la division de Malafolie avec laquelle elles communiquent par divers étages de travaux.

Cependant, compte tenu de leur profondeur, il est possible que les deux travers banc reliant Montrambert et Varenne aient une durée de vie relativement courte, ce qui aboutirait à un isolement de la concession de Montrambert entraînant l'apparition d'une émergence dans le point bas.

La zone vulnérable (carte n°2-14) a été localisée dans le quartier de la piscine au Chambon-Feugerolles, la vallée de l'Ondaine est ici bien marquée, et le lit de la rivière est encaissé par rapport aux habitations alentour.

Dans ces conditions, il est difficile de mettre en doute l'effet de drainage de l'aquifère par le cours d'eau où devrait apparaître l'émergence.

La consultation des archives n'a pas révélé de fentes dans le point bas lui même, un grand nombre de fentes existent cependant dans le quartier des affleurements situé plus en amont, donc à priori non vulnérable car situé à une cote plus élevée dans la concession.

Toutefois, l'exploitation en découverte de ces affleurements est prévue pour l'année à venir, elle entraînera très probablement des modifications de la morphologie superficielle dont il faut tenir compte.

En effet le creusement prévu pour l'exploitation atteindra pratiquement le niveau du point bas de la concession, après remblayage, il y aura donc une zone à perméabilité privilégiée, qui pourra alors devenir un site d'émergence (cette hypothèse est étudiée plus en détail dans le paragraphe relatif aux solutions à adopter en cas d'apparition d'une émergence).

### III-3-7 - Concession de la Béraudière

Il s'agit là d'un secteur problématique de part la position intermédiaire de la concession entre deux bassins versants d'une part, et d'autre part à cause de l'urbanisation importante des différentes zones basses dans lesquelles les cours d'eau ont été canalisés, ce qui entraîne la disparition du drainage naturel de ces quartiers.

Nous verrons cependant que les travaux situés de part et d'autre de la ligne de séparation des eaux ne sont pas reliés, ce qui permet de diviser le secteur en deux zones qui seront étudiées indépendamment, de la même façon que les autres parties du système.

Le schéma n°2-15, issu du dossier de délaissement, retrace la position intermédiaire des travaux de la concession de la Béraudière entre les bassins versants de l'Ondaine et du Furan (versant Saint-Etienne).

Les dernières exploitations dans cette concession datent de 1972 : exploitation des couches des Combes n°1 et n°2 par le puits des Combes (plan n°2-16).

#### \* Versant Saint-Etienne

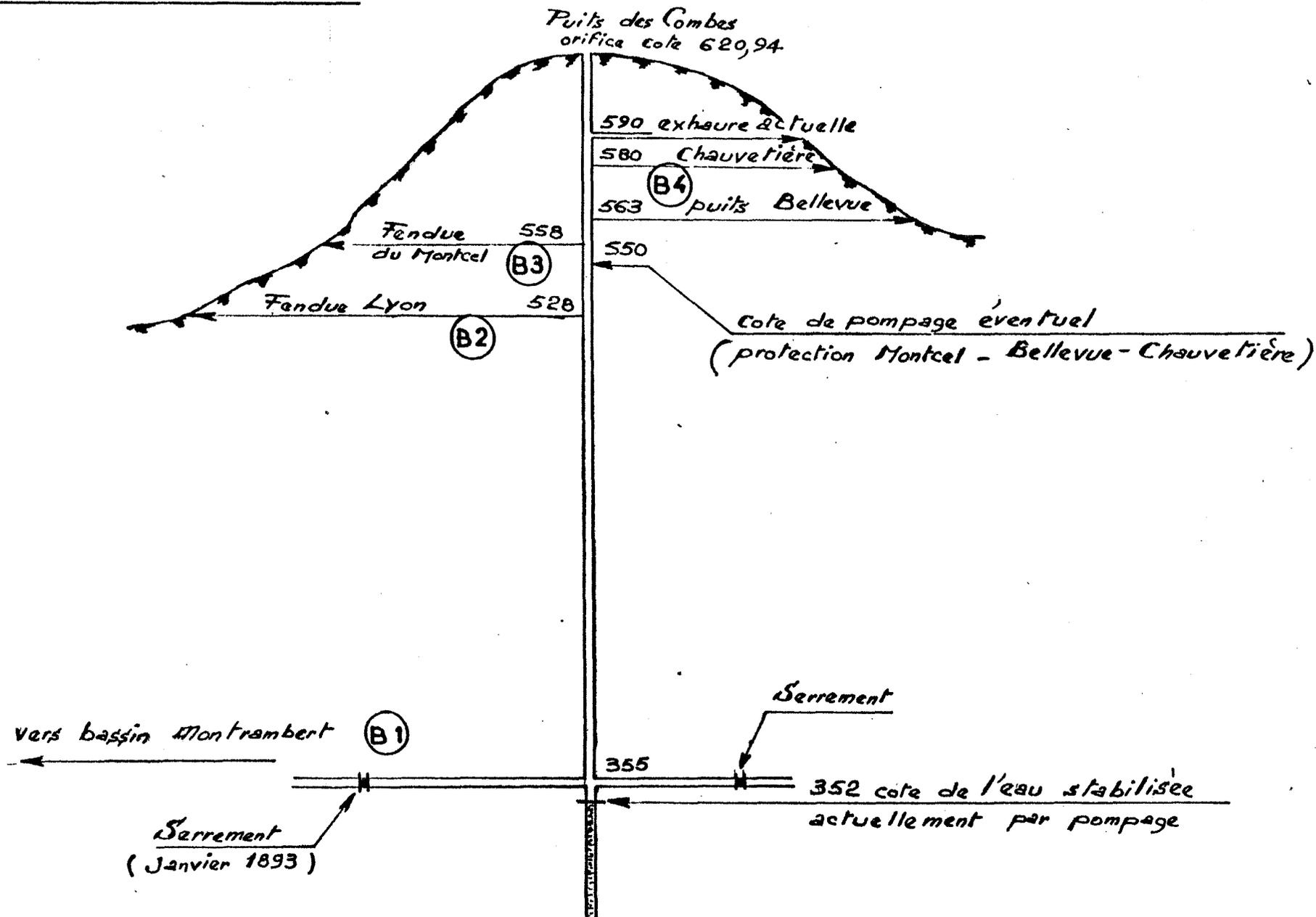
Les travaux se situant sur le versant stéphanois (plan n°2-17) ont été effectués par les puits du Mont, Ferrouillat, et Chauvetière dans la couche de la Chauvetière n°1 (faisceau des Littes) entre les années 1880 et 1904. Ce sont donc des travaux très anciens pour lesquels les archives n'ont pas révélé de communications avec le reste de la concession, c'est la raison pour laquelle, ces travaux, non influencés par l'exhaure dans le reste de la concession devraient avoir retrouvé depuis fort longtemps un équilibre hydrodynamique caractérisé par l'existence d'une émergence assurant l'élimination des eaux, et constituant le "trop-plein" de l'aquifère.

Après avoir déterminé le point bas localisé sur le plan n°2-16, situé dans la Z.I. de Chauvetière, nous avons donc effectué sur le terrain des recherches destinées à découvrir une éventuelle émergence.

En effet, une venue d'eau a été découverte dans les caves de l'entreprise SOFOREC (récupération de matériaux), qui pourrait bien être l'émergence recherchée, ce qui éliminerait toute notion de risque pour les zones situées plus en aval et notamment le quartier de la place Bellevue. Un suivi des

Schéma des exutoires possibles

BASSIN des COMBES - Béraudière



89

FIGURE N°2-17

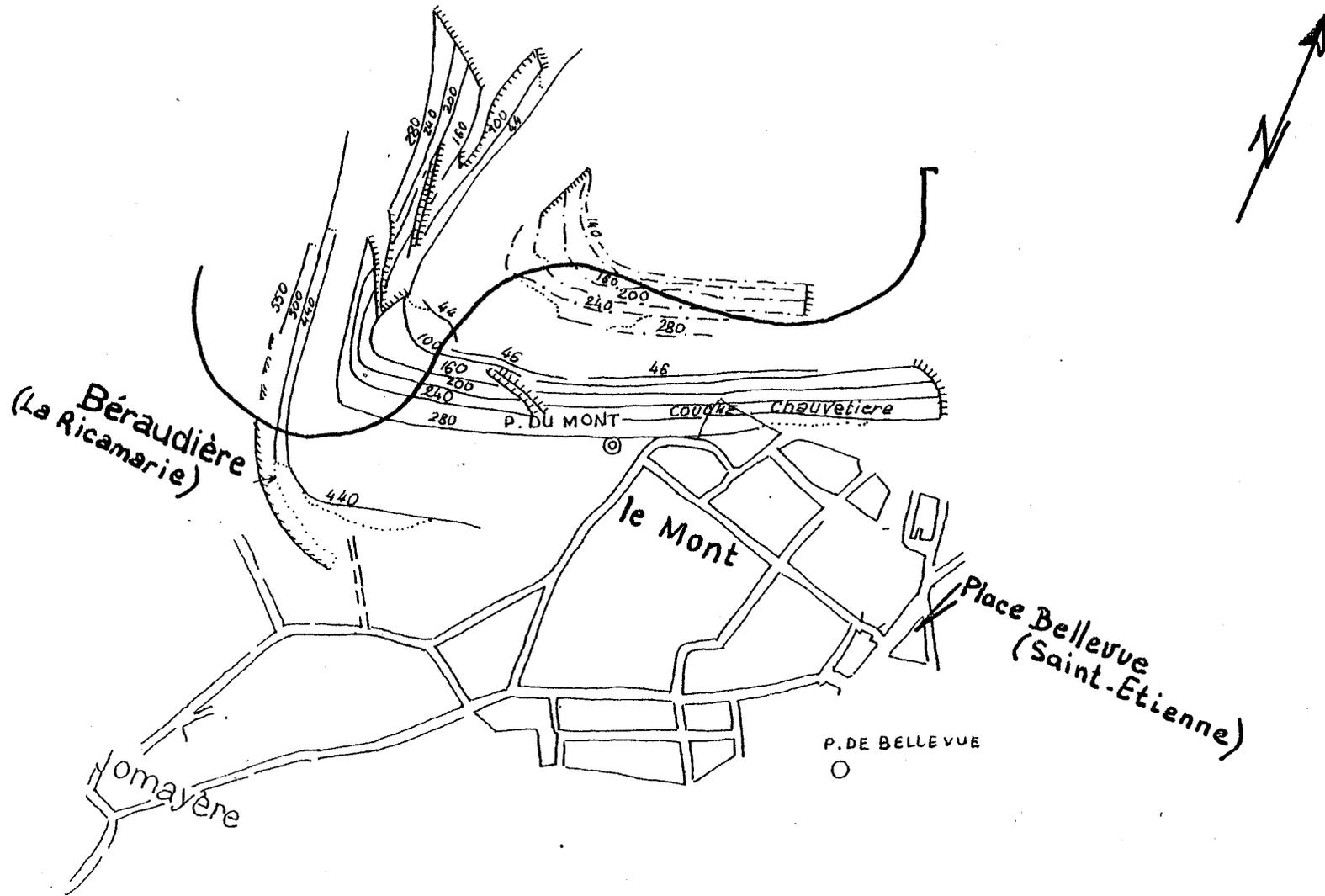


schéma de situation des travaux  
dans la couche de la Chauvetière

Echelle 1/5000°

débites et de la qualité chimique de l'eau aurait pu permettre de confirmer cette hypothèse, cependant, le propriétaire de l'entreprise a malheureusement déjà canalisé cette venue d'eau vers les égouts municipaux, la rendant ainsi inaccessible aux prélèvements.

\* Versant Ondaine

Les travaux situés sur le versant Ondaine représentent l'essentiel de la concession, les couches ont un pendage vers l'est et se retrouvent pour la plupart à l'affleurement dans l'ancienne vallée du Merdant (carte n°2-16) qui drainait autrefois le secteur mais qui est aujourd'hui canalisé, et dont la vallée aplanie et remblayée est le siège d'une zone industrielle.

En générale les travaux de la concession de Montrambert s'arrêtent sur la faille des Maures, cependant, certaines exploitations peu profondes pratiquées dans les couches des Combes n°1 et n°2 viennent chevaucher la concession de Montrambert (figures n°2-8 et 2-16).

Une seule liaison par le fond a été relevée dans les archives à la cote +357 m., elle est obturée par un serrement datant de 1893, et dont l'efficacité actuelle a été prouvée par le fait que le niveau de l'eau dans la concession a actuellement dépassé la cote +357, sans qu'il y ait déversement des eaux vers les travaux de Montrambert.

Cependant les couches des Combes ont aussi été exploitées à partir de Montrambert, et il n'y a aucun doute que des communications existent à ce niveau par les travaux (plan n°2-16),

Coté Montrambert, les travaux ont été effectués par les fendues Lyon (+528 m.) et des Egassons (+567 m.) qui constituent avec la fendue du Montcel (+558m.) trois points bas reliés aux travaux de la Beraudière.

Comme la communication avec les travaux du fond de Montrambert ne se fait pas, les eaux de la concession de la Beraudière devraient trouver des exutoires possibles dans l'une de ces trois fendues.

Remarque : les visites sur le terrain ne nous ont pas permis de localiser la sortie de la fendue Lyon située sous les bassins à schlam dans un secteur prévu pour être exploité en découverte; il est donc probable, même si la fendue est actuellement colmatée que l'exploitation en découverte remettra ces travaux au

jour et permettra les aménagements nécessaires en cas d'apparition d'une émergence.

Les deux autres fendues arrivent au jour dans des terrains appartenant aux houillères de la Loire au pied du terril de Saint Pierre.

Si l'exutoire ne se fait pas par l'une de ces fendues, ou si le débit est insuffisant, il sera nécessaire de surveiller le quartier du Mas à la Ricamarie, dont le point bas se situe au n°6 de la rue J. Roméas (cité Delaynaud, propriété des Houillères) et où il existe des travaux anciens (plan n°2-16).

Ce quartier, situé au confluent des vallées de l'Ondaine du Merdant est une zone d'affleurements qui ne possède plus de drainage naturel en surface et où l'apparition d'une émergence pourrait se faire de façon diffuse le long d'une courbe de niveau, ce qui représenterait un gros inconvénient technique s'il faut canaliser ces eaux.

Les études menées sur la concession de la Beraudière ont aussi porté sur le tunnel S.N.C.F. de la Croix de l'Orme allant de Saint-Etienne à la Ricamarie, et sortant à la cote 456 m. coté Ricamarie (figure n°2-18), soit à une cote supérieure à celle de la fendue Lyon mais inférieure à celle de la fendue du Montcel (donc à priori très vulnérable).

Les recherches effectuées permettent actuellement de ne plus envisager la vulnérabilité de ce tunnel qui se situe hors de la zone d'influence des travaux de la concession comme en témoignent cette figure et la coupe n°2-19.

#### III-4 - Proposition d'une stratégie de surveillance

Toutes les études précédemment menées ont permis de déterminer une stratégie de surveillance de la remontée du niveau de l'eau dans les différentes concessions.

Cette stratégie devait comporter les avantages suivants :

- Possibilité pour les Houillères du bassin de la Loire de remblayer un maximum de puits de mine pour des raisons financières et de sécurité.
- Possibilité de surveillance du niveau d'eau dans toutes les concessions du système aquifère minier.

Parcours du Tunnel S.N.C.F.  
de la Croix de l'orme et  
emplacement des travaux  
anciens les plus proches

coupe n° 2.19

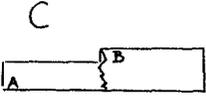
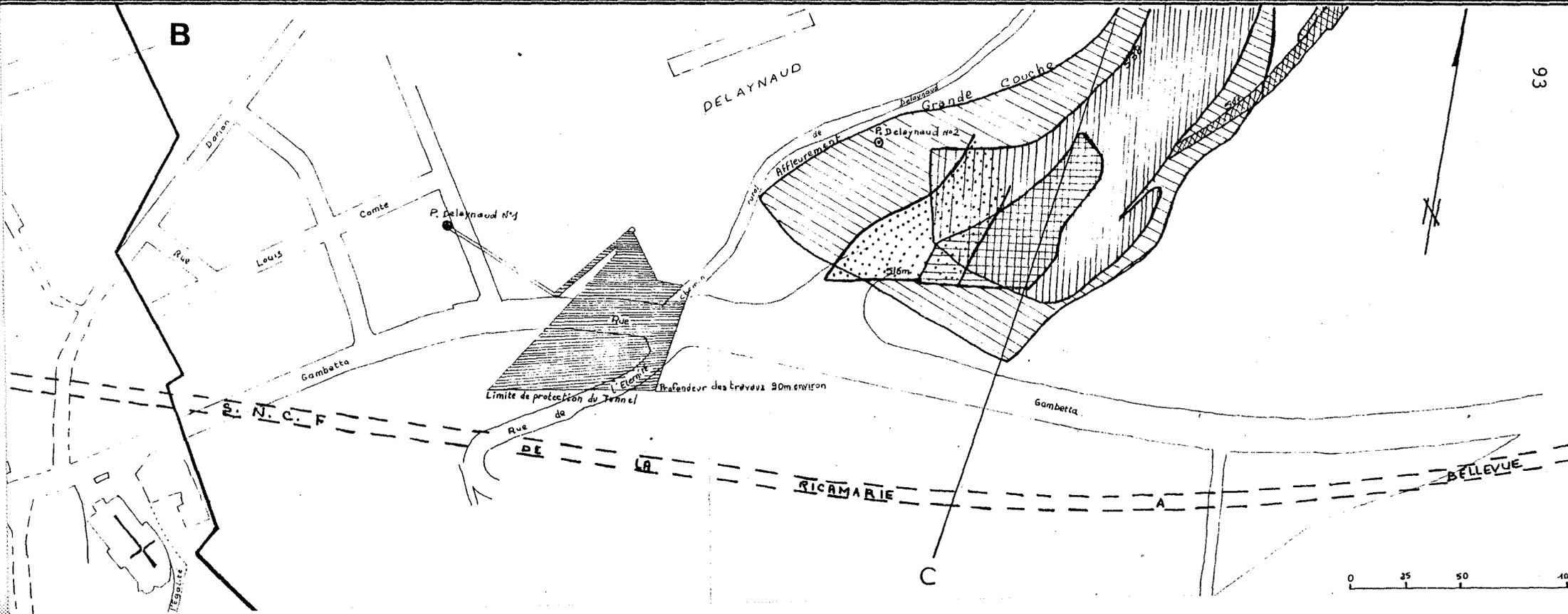
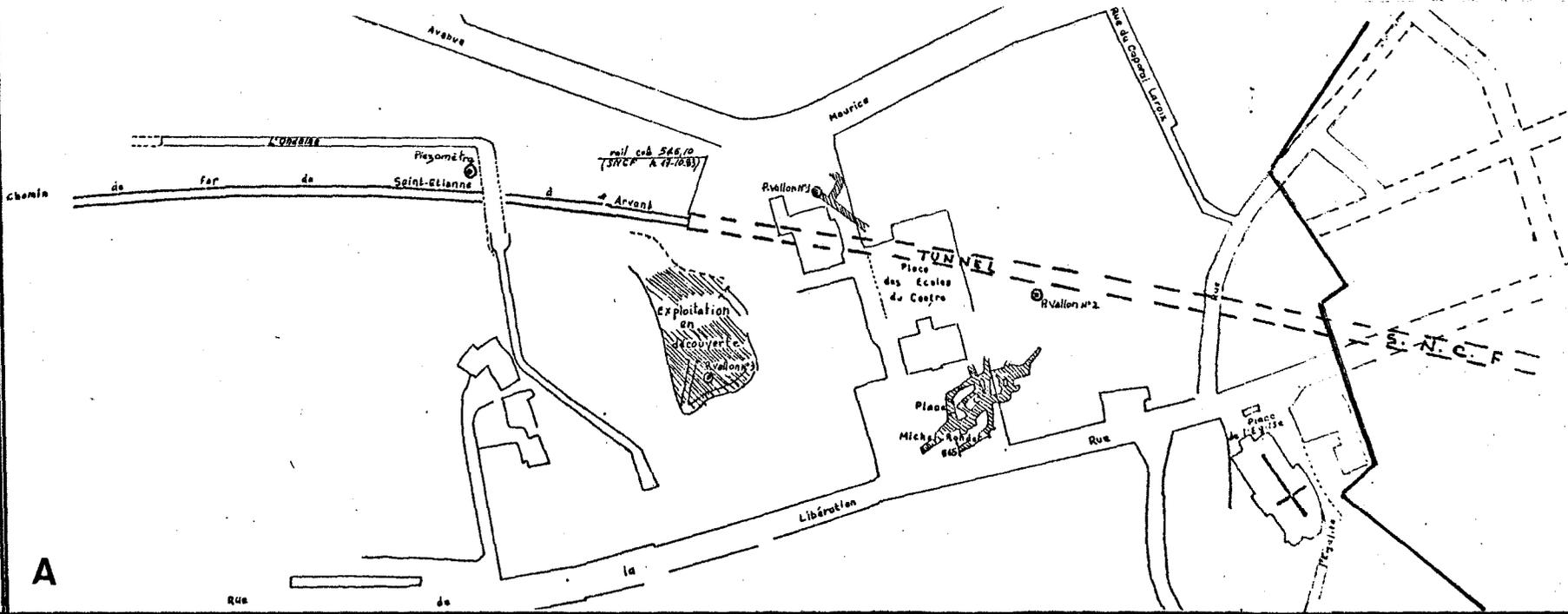


FIGURE N°2-18



COUPE GEOLOGIQUE PASSANT PAR LE TUNNEL DE LA CROIX DE L'ORME

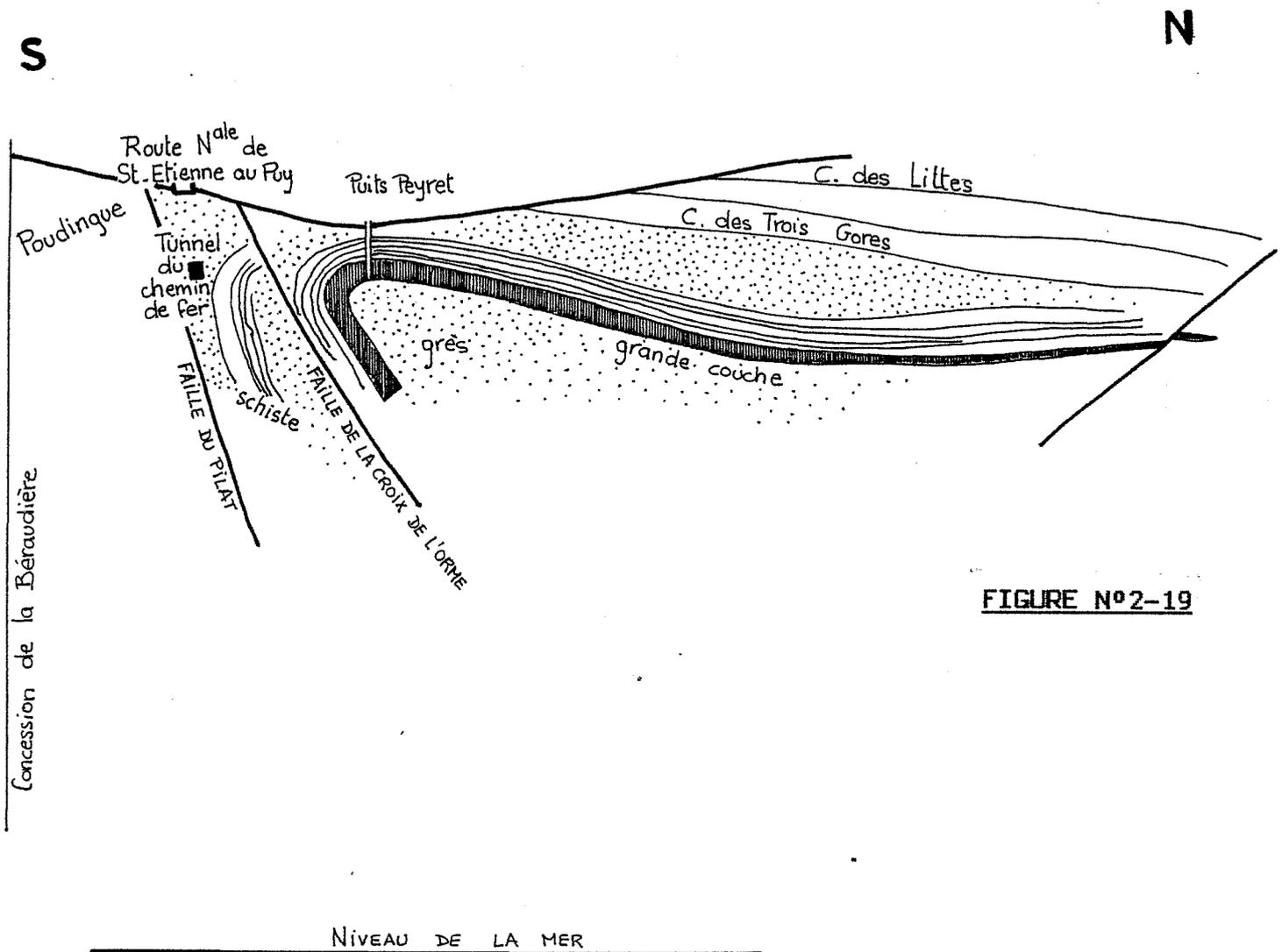


FIGURE N°2-19

- Possibilité de prévoir au moins un ou deux mois à l'avance quelle sera la remontée pour se préparer à réagir en cas de nécessité.
- Possibilité de reprendre rapidement l'exhaure dans l'un ou l'autre des sous-systèmes en cas de problème.

Dans cette optique, la stratégie proposée a été la suivante :

- Cinq puits de mine seront laissés ouverts d'une part pour y effectuer des mesures régulières du niveau d'eau, d'autre part pour y pratiquer éventuellement un pompage en cas de problème ; il s'agit :
  - \* du puits du Marais à Roche-la-Molière
  - \* du puits de la Chana, dans la division de Varenne
  - \* du puits des Granges n°3, dans le nord de la division de Varenne
  - \* du puits du Marais à Montrambert
  - \* du puits des Combes à la Béraudière
- certains points vulnérables ont fait l'objet d'implantations de piézomètres destinés à la surveillance de la nappe dans les 25 derniers mètres de la remontée, dans des zones vulnérables ou bien dans des zones où il n'y a plus de puits de mine ouverts.

Ces piézomètres ont été implantés :

- \* dans la division de la Tour, où tous les puits de Mine sont fermés (usine Creusot-Loire).
- \* dans la division de Malafolie, devant la gare S.N.C.F. de Firminy (surveillance de la nappe au niveau du souterrain de l'autoroute A47), et dans la zone basse, Impasse du Lavoisier à Firminy (cette division ne possède plus de puits de mine ouverts).
- \* dans la division de la Béraudière, au n°6 de la rue J.Roméas, point bas du quartier du Mas à la Ricamarie; et à la sortie du tunnel S.N.C.F. de la Croix de l'Orme. Sur le versant Saint-Etienne, deux piézomètres ont été implantés, l'un dans la zone industrielle de Chauvetière, l'autre sur la place Bellevue (pour y prévenir une éventuelle influence de la remontée de l'eau dans les travaux de la Béraudière).

La fiche technique est la même pour tous ces ouvrages (figure n°2-20), les coupes géologiques sont données en annexe n°3, ils ont tous été implantés dans des terrains contenant déjà de l'eau, c'est la raison pour laquelle il a été nécessaire d'étudier de façon approfondie les caractéristiques chimiques différentielles des eaux de surface et des eaux ayant transité dans des travaux miniers afin de déterminer par son influence qualitative la présence de l'eau de l'aquifère "minier" dans ces ouvrages.

Pour compléter la surveillance du système, il sera nécessaire d'effectuer un suivi régulier de la qualité chimique de l'eau dans les différents ouvrages de contrôle.

Bien entendu, ce dispositif n'est pas figé, il nécessite un suivi régulier de la situation hydrogéologique ; si une résurgence apparaît dans une zone non vulnérable, et permet une stabilisation du niveau de l'eau dans une partie du système, on pourra envisager le remblayage du puits de mine après confirmation de la stabilisation de la situation par une étude hydrogéologique approfondie du secteur concerné.

De même, les suivis piézométriques et chimiques pourront cesser après avis d'un expert.

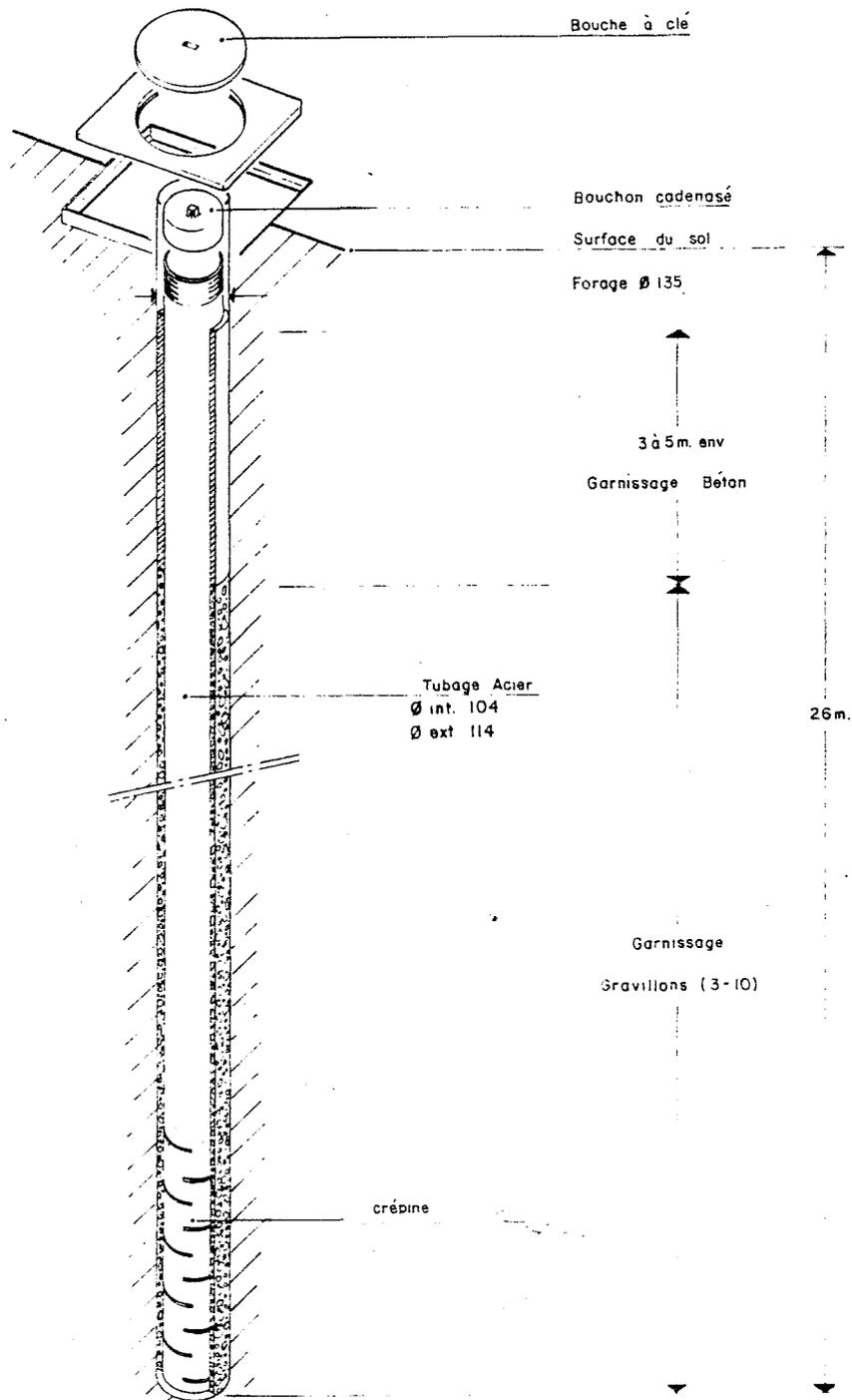
Ce système de surveillance, défini dans un premier temps à l'Ecole Nationale Supérieure de mines de Saint-Etienne à partir des études hydrogéologiques réalisées sur le secteur, a par la suite donné lieu à un travail commun avec la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche, et les Houillères de la Loire.

Cette première phase de travail a fait l'objet d'un premier rapport soumis à l'approbation de divers organismes locaux (mairies, D.D.E., D.D.A., D.D.A.S.S. etc...), à la suite de quoi, il a abouti à la rédaction d'un arrêté préfectoral que l'on trouvera en annexe n°4.

Un certain nombre de directives ont ainsi été données aux houillères, concernant les dispositions à prendre à la suite de l'arrêt des exploitations souterraines, les mesures piézométriques, pluviométriques et les analyses chimiques faisant l'objet de rapports mensuels aux divers organismes concernés.

## FIGURE N° 2-20

## FICHE TECHNIQUE DES PIEZOMETRES



Le suivi et l'interprétation régulière de ces données devrait alors permettre de surveiller et de dominer le processus de remontée de l'eau dans les diverses concessions. A long terme, l'accumulation de ces données pourrait apporter des renseignements utiles sur le milieu étudié, elles nécessiteraient cependant une gestion informatisée permettant d'en tirer de façon pratique les renseignements les plus importants, l'annexe n°5 apporte quelques éléments de réflexion à ce sujet.

### III-5 - Quelques solutions à adopter en cas d'apparition d'une émergence

#### III-5-1 - Présentation

Si la nappe aquifère de la mine, en arrivant à la surface ne trouve pas un exutoire dans un cours d'eau, il faudra nécessairement capter les eaux pour les ramener vers le réseau hydrographique naturel. Les techniques à adopter peuvent être très différentes selon les cas de figure.

Notons tout d'abord, que le terme de "résurgence", jusqu'alors couramment usité dans la région pour les écoulements superficiels d'eau de mine, est inexact. Une résurgence correspond, en effet, à la réapparition au jour d'un cours d'eau ayant cheminé plus ou moins longtemps dans le sous-sol, le type même en étant la fontaine du Vaucluse. Cette remarque est importante dans la mesure où elle conditionne le mode de captage de l'eau.

Les "résurgences" minières sont, en fait, des émergences de nappe. C'est-à-dire qu'elles correspondent à des zones d'intersection entre la surface piézométrique et la surface topographique, et apparaissent, en générale en un point préférentiel de l'intersection, où l'eau peut se frayer plus facilement un passage.

Le captage de telles sources nécessite quelques précautions, dont la plus importante est de ne pas surélever le niveau de sortie de l'eau afin de ne pas empêcher l'écoulement en ce point au risque de détourner les filets d'eau vers une autre zone d'émergence.

Si l'émergence est ponctuelle, la solution la plus simple et la plus efficace consiste à creuser légèrement au droit du point d'émergence afin de récupérer les eaux qui seront ensuite canalisées et rejetées dans le ruisseau le plus proche. Cependant, l'apparition ponctuelle de l'émergence représente le cas optimal et le plus facile à traiter.

Les conditions nécessaires à l'apparition de telles émergence sont bien souvent réalisées dans le cas du système étudié, et ceci grâce à l'existence des "fendues" qui jouent naturellement le rôle de tranchée drainante et captent les filets d'eau qu'elles dirigent vers l'extérieure.

Le site idéal présente, à la fois un point bas correspondant à une vallée, une zone d'affleurement de couches de charbon exploitées et une fendue. C'est le cas notamment, sur le secteur de Saint-Etienne, pour les "résurgences" du Cluzel n°2, de Villars et de la Talaudière.

Si toutes ces conditions ne sont pas réunies (absence de fendue notamment), on pourra voir apparaître l'émergence de façon plus diffuse le long d'une courbe de niveau, ou bien, si la zone est plane, sur une surface plus étendue entraînant l'apparition d'une zone marécageuse. C'est le cas de la "résurgence" de la Sauvagère à Saint-Etienne.

Là, le problème est plus difficile à traiter, et le captage des eaux, s'il est nécessaire occasionne des travaux plus importants.

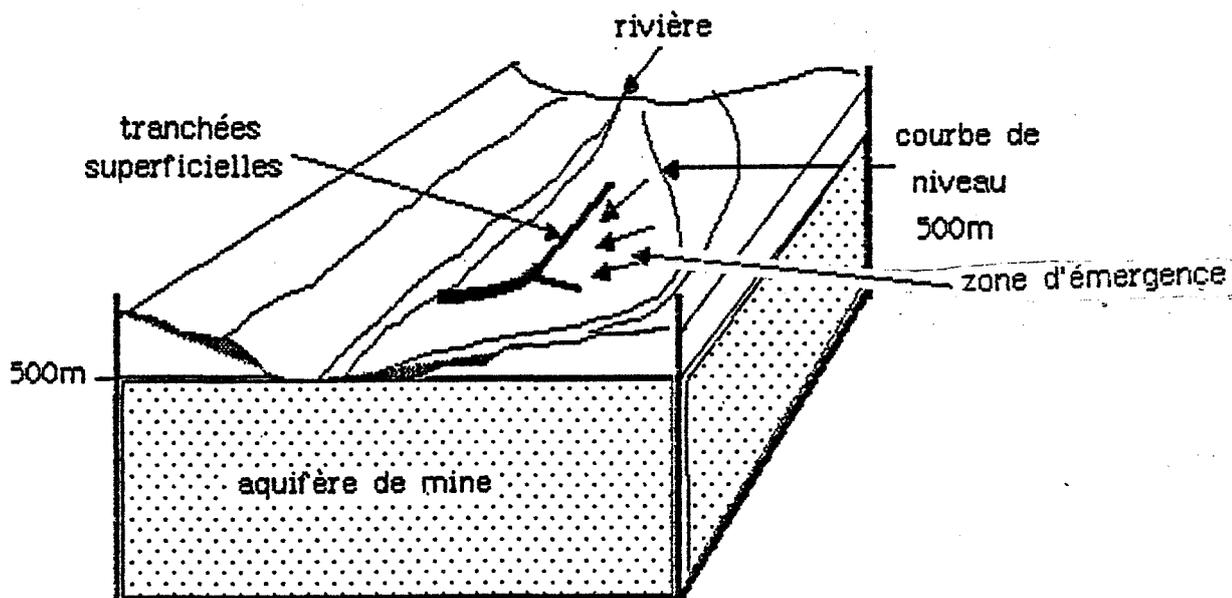
La très faible perméabilité des terrains superficiels, en l'absence d'affleurement exploités, rend inefficace le captage des eaux par pompage dans un puits : le rayon d'influence de l'ouvrage dans de tels terrains reste toujours très faible (cf. pompage dans le puits Couriot à Saint-Etienne).

On recourra donc à un système de captage des eaux soit par des tranchées superficielles, soit par un système de drains rayonnants souterrains recoupant un maximum de filets d'eau, avec exhaure par écoulement gravitaire (C. BERGERON, T. POINTET - 1983).

Si l'émergence apparaît en zone rurale, le problème reste moins délicat, on pourra dans ce cas, circonscrire la zone à l'aval par une tranchée superficielle (figure n°2-21) recueillant les eaux qui seront ensuite acheminées vers le ruisseau le plus proche par gravité.

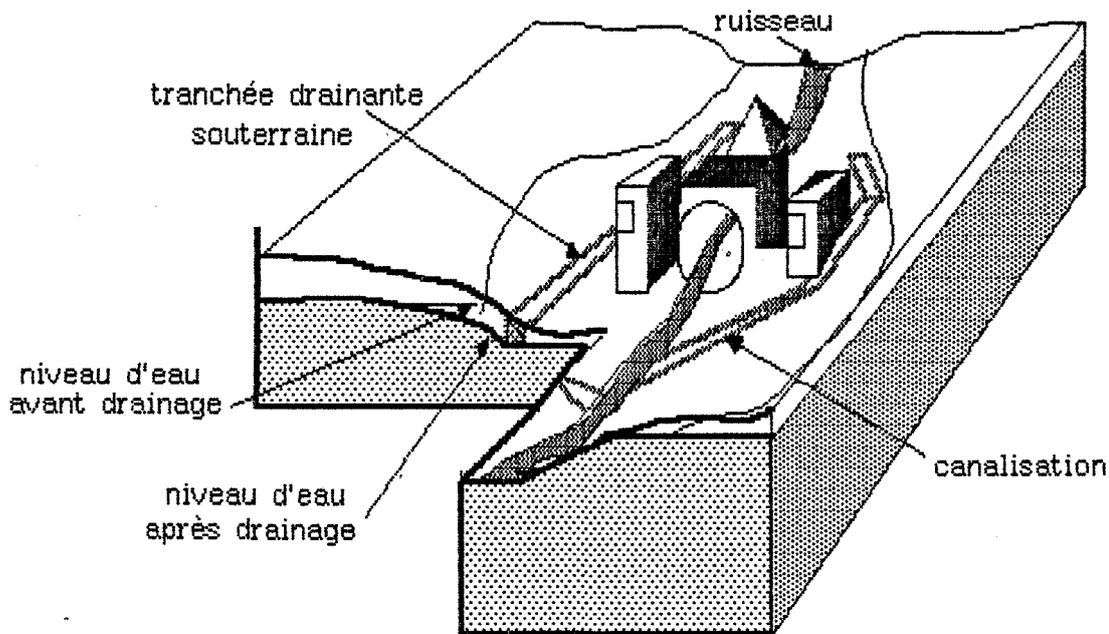
Par contre, si la zone est construite, il sera nécessaire de recourir à une solution plus radicale pour supprimer les écoulements de surface.

Si la topographie est peu contrastée, on choisira de mettre en place des drains souterrains recoupant les écoulements à l'amont de la zone construite (figure n°2-22).



**FIGURE N°2-21**

SI L'EMERGENCE APPARAÎT EN ZONE RURALE  
LA ZONE SERA CIRCONSCRITE A L'AVANT PAR  
DES TRANCHEES SUPERFICIELLES



**FIGURE N°2-22**

DISPOSITIF DE DRAINAGE PRECONISE POUR UNE ZONE D'EMERGENCE  
URBANISEE A PENTE FAIBLE

S'il existe une pente non négligeable, un système de drains mis en place à l'amont devrait être très profond pour être efficace, on choisira donc de provoquer la résurgence à l'aval en recueillant, comme l'aurait fait une fendue, les filets d'eau. Pour cela, un système de drains rayonnants pseudo horizontaux, recoupant un maximum de filets d'eau, provoquera la convergence des écoulements vers le point choisi plus en aval (figure n°2-23).

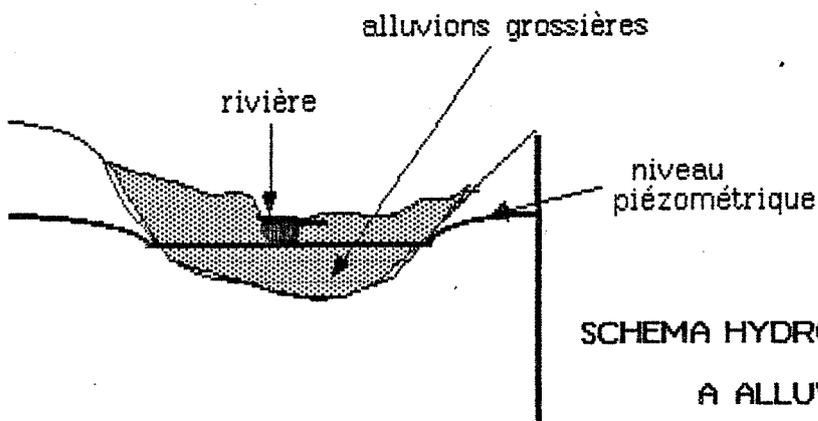
Remarque : les différentes solutions sont proposées dans un ordre croissant de coût, il faudra donc veiller dans tous les cas à choisir la moins onéreuse en fonction de la configuration locale du problème.

### III-5-2 - Solutions proposées pour les différentes zones vulnérables des vallées de l'Ondaine et du Lizeron

#### a - Les zones situées dans la vallée de l'Ondaine

Ce sont les zones vulnérables des concessions de Montrambert, Malafolie et la Tour, elles ne posent pas de problème dans la mesure où les résurgences apparaîtront très probablement dans le lit de la rivière.

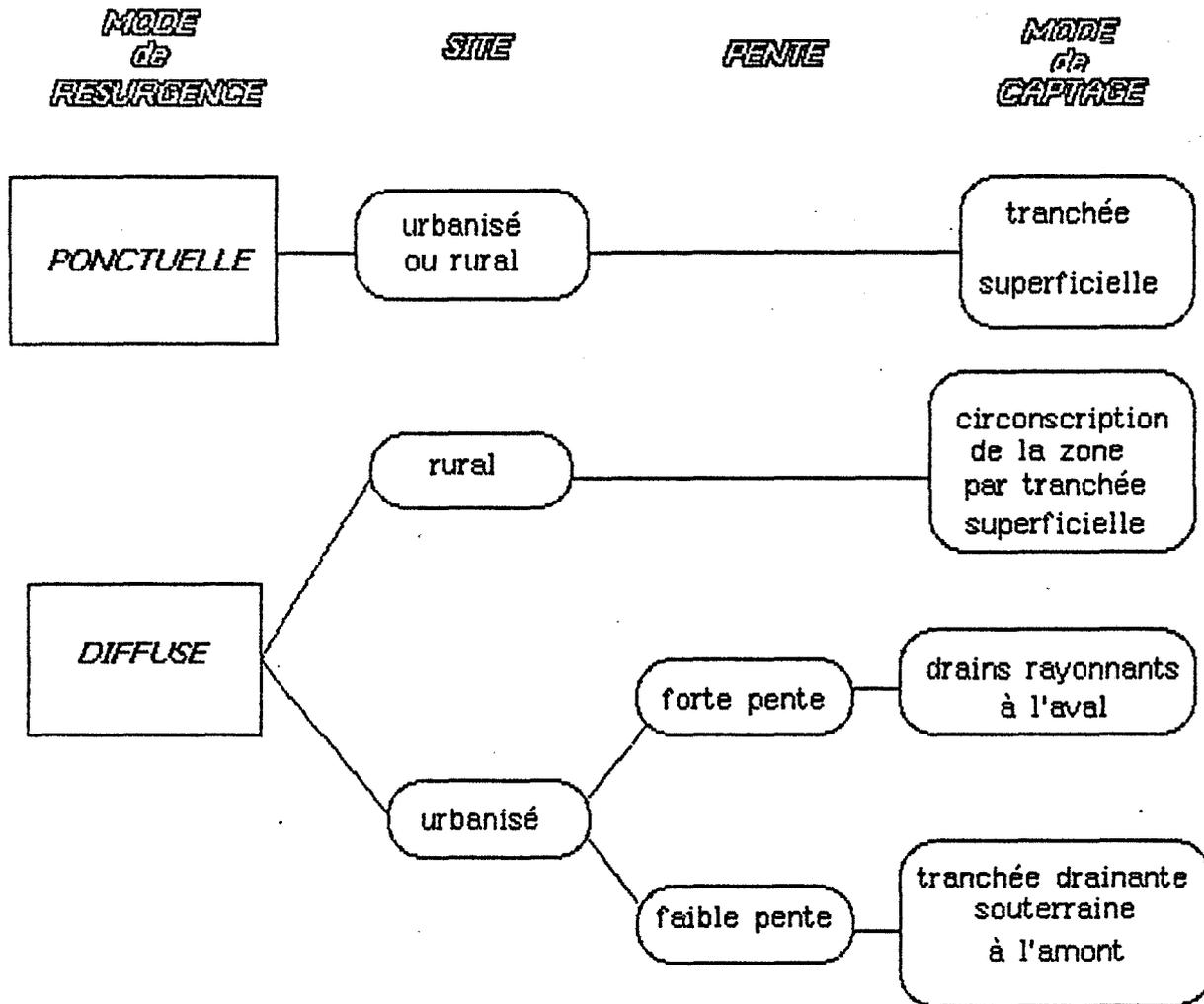
En effet, l'Ondaine est une rivière relativement encaissée dont le régime torrentiel s'accompagne d'alluvions relativement grossières et perméables. L'ondaine et ses alluvions joueront donc naturellement un rôle de drain pour la nappe souterraine entraînant l'apparition d'un schéma hydrogéologique du type suivant (figure n°2-24):



**FIGURE N°2-24**

**SCHEMA HYDROGEOLOGIQUE DANS LE CAS D'UNE RIVIERE  
A ALLUVIONS GROSSIERES ET PERMEABLES  
DRAINAGE DE L'AQUIFERE PAR LA RIVIERE ET SES ALLUVIONS**

Remarque : ce schéma correspond très probablement à ce qui s'est produit dans la vallée du Giers, où l'arrêt de l'exhaure n'a posé aucun problème.



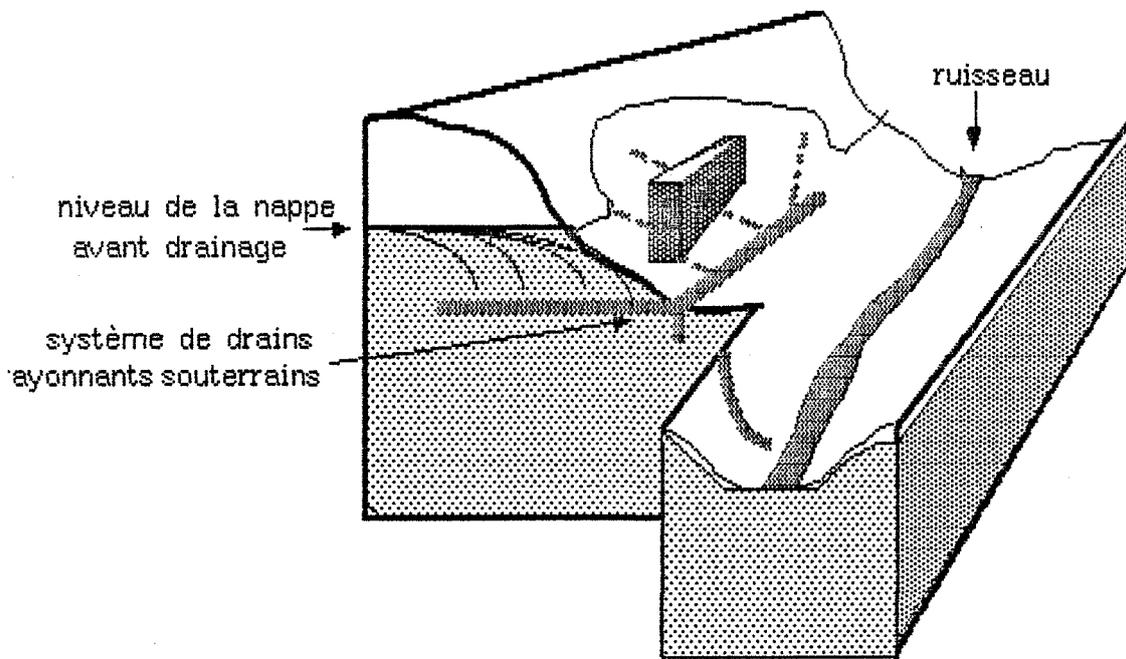


FIGURE N°2-23

DISPOSITIFS PROPOSES POUR UNE ZONE D'EMERGENCE

URBANISEE ET A FORTE PENTE

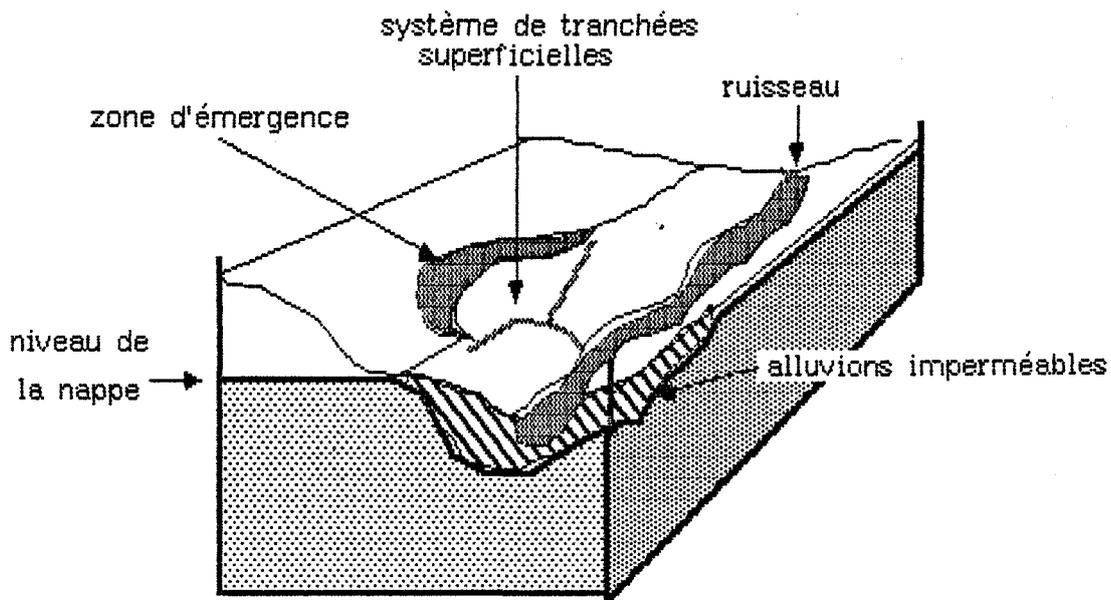


FIGURE N°2-25

DIVISION DE ROCHE-LA-MOLIERE : L'EMERGENCE  
SE PRODUIRA SANS DOUTE EN LIMITE DES ALLUVIONS  
IMPERMEABLES

Si toutefois ce n'était localement pas le cas, le problème deviendrait spécifique (compte tenu de l'urbanisation intensive de la vallée) et nécessiterait une étude hydrogéologique approfondie de la zone.

b - La concession de la Béraudière, la zone des affleurements à Montrambert

\* la fendue Lyon, le quartier des affleurements.

La fendue Lyon, qui constitue le point le plus bas pour la concession de la Béraudière, est actuellement colmatée par la présence des bassins à "schlam" de l'exploitation de Montrambert. La zone serait pourtant l'une des moins défavorables pour l'apparition d'une émergence dans la concession de la Béraudière qui ne présente pas de réseau hydrographique de surface suffisamment développé pour drainer les eaux de la nappe en un point précis.

Cette zone correspond d'autre part au quartier des affleurements de la concession de Montrambert. Ce n'est pas le point bas du quartier mais l'exploitation prochaine de la découverte de Marseille, provoquant un surcreusement local dans les terrains superficiels, entraînera sans doute une modification des écoulements. Cela pourrait faciliter l'apparition d'une émergence en ce lieu plutôt que dans le point bas de la concession qui ne correspond pas à des affleurements.

Nous recommanderons donc de profiter de la présence des entreprises, lors de l'exploitation de la découverte pour réaliser un aménagement prévisionnel de ce secteur particulièrement critique.

Les travaux qui pourraient être réalisés sont les suivants :

- Dégager l'ouverture de la fendue Lyon afin de favoriser l'écoulement des eaux contenues dans les travaux de la Béraudière vers ce secteur.
- La fendue remise à jour sera obturée pour des raisons de sécurité, mais on prendra garde à ne pas gêner le passage de l'eau (la construction d'un mur en moellons, ou la mise en place d'une porte blindée seraient par exemple possibles si les écoulements peuvent se faire par dessous ou latéralement).
- On pourra aussi profiter du creusement momentané des terrains pour créer

dans cette zone d'affleurement importante, une tranchée drainante allant se déverser plus en aval soit dans l'Ondaine, soit dans l'égout des houillères circulant le long des bâtiments de Pigeot et de Montrambert.

- La mise en place d'une canalisation PVC entourée de matériaux grossiers et perméables, avant remblayage de la découverte, permettrait d'une part de recueillir les eaux de la résurgence potentielle de la fendue Lyon, et d'autre part, d'assurer un drainage efficace des terrains alentours afin de "provoquer" en quelque sorte une éventuelle résurgence dans le secteur pour la concession de Montrambert.

Un tel dispositif assurerait la prévention des risques futurs, et permettrait ainsi de gérer les écoulements dans un secteur qui sera sans-doute transformé, à l'avenir en zone de loisir ou en zone industrielle.

\* la fendue du Montcel

Plus élevée que la fendue Lyon, elle est cependant liée de façon plus directe aux travaux de la concession de la Béraudière.

En cas d'émergence, les eaux pourront être collectées dans une tranchée superficielle et rejetées dans le réseau d'égout municipal en aval

\* la fendue des Egassons

Son altitude ne devrait pas en faire une zone d'émergence, elle peut cependant fonctionner en cas de hautes eaux comme un trop plein.

Si une émergence s'y produit, elle ne posera aucun problème dans la mesure où la fendue débouche au jour à quelques mètres d'un ruisseau.

b - Division de Varenne Nord

C'est une zone à problème car il est difficile de savoir, compte tenu de la configuration piézométrique des puits des Granges et des Combes, si elle est reliée au reste de la division.

Si elle est effectivement isolée, les zones vulnérables, situées dans les hautes vallées de la Roare et du Péchier sont reportées sur le plan n°2-

11.

Ce sont des zones d'affleurement qui correspondent à des points bas, et où l'on note la présence de nombreuses constructions. La consultation des archives a révélé la présence de très anciennes fendues dans la haute vallée du Péchier, mais il n'en existe pas dans la haute vallée de la Roare.

Il est très difficile, à l'heure actuelle de prévoir le point ou la zone précise de l'émergence si elle se produit.

L'écoulement venant probablement de l'est, on choisira la solution optimale parmi celles proposées dans le premier paragraphe de ce chapitre, en fonction du type de l'émergence et de sa position par rapport aux habitations.

#### c - Concession de Roche-la-Molière

On peut, à l'heure actuelle, dire sans grand risque, que cette concession est isolée du reste du système.

La zone d'émergence probable se situe dans la vallée du Péchier, point bas et zone d'affleurement, dans un secteur rural, ce qui constitue un cas de figure extrêmement favorable.

On peut cependant craindre que l'émergence ne se produise pas dans le lit de la rivière pour différentes raisons :

- La rivière est canalisée
- Son parcours ne suit pas exactement le point bas du vallon.
- Les alluvions du Lizeron sont très probablement peu perméables.

Une telle configuration devrait conduire au schéma hydro-géologique représenté sur la figure n°2-25.

L'émergence se faisant probablement de façon relativement diffuse, on choisira de la circonscrire à l'aval à l'aide d'une tranchée superficielle. Les eaux ainsi recueillies seront amenées dans le Lizeron par le chemin le plus court à travers champs.

TROISIEME PARTIE

ANALYSE CHIMIQUE - AGRESSIVITE  
DES EAUX DE MINE VIS-A-VIS DES BETONS

## I - Introduction

Pour compléter l'approche du milieu concerné par notre travail, il paraissait indispensable d'effectuer une étude concernant la qualité des eaux rencontrées sur le secteur, aussi bien pour en connaître l'agressivité vis à vis des bétons, que pour pouvoir déterminer dans les piézomètres l'arrivée de la nappe profonde des terrains miniers.

A la demande de la D.R.I.R (Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche), les Houillères du Bassin de la Loire ont effectué, entre le 16 et le 24 novembre 1983, une série de prélèvements d'échantillons d'eau pour analyse. Ces prélèvements ont été réalisés en surface en des lieux choisis par l'école des mines de Saint-Etienne afin de constituer un échantillonnage de base représentatif de la qualité des eaux du secteur réunissant, à l'ouest de Saint-Etienne, les vallées de l'Ondaine et du Lizeron.

Parallèlement des échantillons provenant de différents points de la mine avant sa fermeture ont été prélevés.

Nous traiterons ici, de l'interprétation des analyses de ces différents échantillons afin de déterminer, d'une part, l'évolution de la qualité d'une eau de mine lors du remplissage des travaux miniers, et d'autre part les critères permettant de distinguer les "eaux profondes" des "eaux de surface" .

Il s'agira ensuite, de déterminer l'agressivité de ces eaux vis-à-vis des bétons, d'abord par une étude bibliographique, puis par des essais in-situ.

## II - Etude chimique des eaux des vallées de l'Ondaine et du Lizeron

### II-1 - Choix de l'emplacement des prélèvements

#### II-1-1- Eaux prélevées en surface

La campagne de prélèvements (du 16 au 24 novembre 1983) a porté sur toutes les eaux accessibles en surface, a savoir :(figure n°3-1, carte annexe n°6).

- Les eaux des ruisseaux des bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron ruisselant sur des travaux miniers (à l'exception du Pirafoy, affluent du Lizeron

n°	Date	Origine	T°C
1	16-11-83	Ruisseau LE MERDANT, LA RICAMARIE	12,1
2	16-11-83	Ruisseau l'ONDAINE , LE CHAMBON FEUGEROLLES	8,3
3	16-11-83	Ruisseau LE MALVAL , LE CHAMBON FEUGEROLLES	23,1
4	16-11-83	Ruisseau l'ECHAPRE , FIRMINY	7,3
5	16-11-83	Ruisseau LE PATEUX , FIRMINY	8,2
6	16-11-83	Ruisseau l'ONDAINE , FIRMINY	10,6
7	16-11-83	Ruisseau l'ONDAINE , UNIEUX	11,6
8	23-11-83	Ruisseau LA POMMARAISE , ROCHE-LA-MOLIERE	7,0
9	23-11-83	Ruisseau LE PECHIER , ROCHE-LA-MOLIERE	21,8
10	23-11-83	Ruisseau LE LIZERON , ROCHE-LA-MOLIERE	12,4
11	23-11-83	Ruisseau l'EGOTAY , SAINT-ETIENNE (S <sup>t</sup> VICTOR SUR LOIRE)	1,1
12	23-11-83	Piézomètre , FIRMINY GARE	13,2
13	23-11-83	Piézomètre , FIRMINY Impasse du LAVOIR	11,7
14	24-11-83	Piézomètre , LA RICAMARIE Cité DELAYNAUD	11,5
15	24-11-83	Piézomètre , SAINT-ETIENNE Z.I. CHAUVETIERE	12,0
16	24-11-83	Exhaure puits des COMBES , LA RICAMARIE	22,0
17	23-11-83	Exhaure puits de la CHANA , ROCHE-LA-MOLIERE	21,0
18	23-11-83	Puits des GRANGES N°3 , ROCHE-LA-MOLIERE	14,9
19	23-11-83	Exhaure puits du MARAIS , ROCHE-LA-MOLIERE	25,3
20	24-11-83	Exhaure puits PIGEOT , LA RICAMARIE	28,0
21	16-11-83	Drainage tunnel S.N.C.F. LA CROIX DE L'ORME	7,7
22	16-11-83	Résurgence dans l'ONDAINE , UNIEUX	15,9
23	24-11-83	Drainage fendue des EGASSONS , LA RICAMARIE	5,6
24	23-11-83	Résurgence dans LA POMMARAISE , ROCHE-LA-MOLIERE	4,5
25	24-11-83	Drainage du souterrain de l'autoroute A47 , FIRMINY	11,1

**TABLEAU N°3-1**

ANALYSE D'EAUX D'EXUTOIRE OU DE RESURGENCES-PROVENANCE

ne présentant pas d'écoulement à l'époque des prélèvements).

- Les eaux de quatre piézomètres implantés dans le secteur au moment des prélèvements :

- Piézomètre de la gare à Firminy
- Piézomètre de l'impasse du Lavoir à Firminy
- Piézomètre cité Delaynaud à la Ricamarie
- Piézomètre zone industrielle Chauvetière à Saint-Etienne

- Les eaux d'exhaure des quatre puits de mine possédant une station de pompage :

- Puits du Marais à Roche-la-Molière
- Puits de la Chana à Roche-la-Molière
- Puits Pigeot à La Ricamarie
- Puits des Combes à La Ricamarie

- L'eau stagnant dans le Puits des Granges n°3 à Roche-la-Molière

- Certaines eaux provenant soit de points particuliers associés à certains ouvrages, soit de petites "résurgences":

- Eau de drainage du tunnel S.N.C.F. de la Croix de l'Orme à La Ricamarie
- Eau de la fendue des Egassons à La Ricamarie
- Eau de drainage du souterrain de l'autoroute A47 à Firminy
- Eau de résurgence dans la Pommaraise à Roche-la-Molière
- Eau de résurgence dans l'Ondaine à Unieux

#### II-1-2- Eaux prélevées dans la mine

Les prélèvements d'eau dans la mine ont été effectués par Monsieur BEAL ingénieur aux houillères du bassin de la Loire, entre le 25-03-83 et le 15-04-83.

Ils concernent les venues d'eau issues des différentes concessions encore accessibles en mars-avril 1983, avant fermeture de la mine et arrêt de l'exhaure dans ces différents travaux.

II-2 - Environnement

L'Ondaine et le Lizeron sont deux cours d'eau s'écoulant à l'ouest de Saint-Etienne vers la Loire.

La vallée de l'Ondaine est industrielle, elle traverse les villes de La Ricamarie, le Chambon-Feugerolles, Firminy et Unieux. Pour toutes ces agglomérations, l'Ondaine et ses affluents représentent le système collecteur principal des eaux usées domestiques et industrielles; ces eaux sont traitées par la station d'épuration du Pertuiset située en aval de l'Ondaine juste avant son confluent avec la Loire; tous les prélèvements concernés par cette étude se situent en amont de cette station.

Le Lizeron prend naissance au confluent du Péchier, de la Pommaraise et du Pirafoy au nord de Roche-la-Molière. Les égouts de la ville rejetés dans ces trois ruisseaux (parfois doublés de collecteurs parallèles), sont traités par une station d'épuration située à leur confluent.

L'importance des rejets domestiques dans les deux bassins versants de l'Ondaine et du Lizeron permet donc de prévoir pour un certain nombre d'échantillons des teneurs élevées en matières en suspensions et des teneurs non négligeables en DBO et Chlore.

Citons le Merdant (canalisé sur toute sa longueur, ce ruisseau n'a plus qu'un rôle d'égout) et le Pateux dont les eaux bien que canalisées, peuvent être en rapport avec la décharge d'ordures ménagères de Saint-Etienne dite décharge "du Pateux".

Outre l'influence des rejets industriels ou domestiques, les eaux de surface prélevées peuvent être soumises à une influence minière qui se caractérise soit par des rejets d'eaux d'exhaure, soit par le transit de l'eau au travers d'un terril ou de terrains miniers.

Nous considérerons comme eau "de mine" toutes les eaux directement issues de la mine (eaux d'exhaure, eau du puits des Granges n°3) et les eaux influencées par la mine de façon évidente (eaux du Péchier et du Lizeron dans lesquels sont rejetées les eaux d'exhaure du puits du Marais de Roche-la-Molière, eau du Pateux circulant près d'un terril, eau de la fendue des Egassons...).

## II-3 - Présentation des résultats

Les résultats des deux séries d'analyses seront présentés séparément car, les dates de prélèvement étant différentes, il ne serait pas raisonnable d'interpréter les résultats simultanément.

### II-3-1- Eaux prélevées en surface

Pour cette première série de prélèvements, l'échantillonnage ayant été fait en période d'étiage prononcé, les résultats obtenus correspondent aux charges solides les moins diluées que l'on puisse rencontrer dans les eaux prélevées.

Les individus récoltés étant très différents les uns des autres tant par leur provenance géographique qu'hydrogéologique, nous avons choisi de dresser pour chacun d'eux une fiche signalétique précise accompagnée d'un commentaire sur la qualité de l'eau (annexe n°6).

Sur ces fiches apparaissent les éléments suivants :

- Date et emplacement précis de l'échantillonnage
- Caractéristiques générales du site de prélèvement
- Concession et commune d'origine
- Température au moment du prélèvement
- Analyse chimique complète comprenant :
  - . PH
  - . Extrait sec (en milligrammes par litre)
  - . Titre hydrotimétrique (TH en degrés français)
  - . Titre alcalimétrique complet (T.A.C. en milliéquivalents par litre (mé/1))
  - . Concentrations en ions, en milligrammes par litre (mg/l): calcium (Ca<sup>++</sup>), magnésium (Mg<sup>++</sup>), fer (Fe<sup>++</sup>), manganèse (Mn<sup>++</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>--</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>), bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)
- Le CO<sub>2</sub> libre (mg/l)
- Les matières en suspension (M.E.S. en mg/l)
- La demande chimique en oxygène (DCO)
- La demande biologique en oxygène en 5 jours (DBO)
- L'oxygène dissous (mg/l)

RÉSULTATS DES ANALYSES D'EAUX PRELEVEES EN SURFACE (mg/l)

n°	PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	MES	DCO	DBO	O <sub>2</sub> diss.	ρ
1	7,00	570	6,4	3,85	18,4	5,9	1,15	0,15	62,0	61,6	58,5	234,9	0	148	555	235	4,2	1500
2	7,4	475	18,3	4,56	41,5	19,75	0,4	0,25	63,0	115,2	32,5	278,2	0	19	59	30	6,0	1400
3	7,4	372	10,95	2,08	28,4	9,35	2,4	-de0,05	31,0	36,8	30,5	126,9	0	124	133	37	6,2	2700
4	7,05	294	6,3	1,52	20,4	4,25	0,25	-de0,05	38,25	28,0	49,5	92,7	0	47	176	59	8,3	2500
5	7,90	2200	89,0	19,4	100,0	145,0	4,95	1,95	250,0	640,0	305,0	1183,7	0	56	198	19	8,6	330
6	7,55	710	25,0	5,9	55,0	28,5	2,10	0,40	97,5	184,0	54,0	360,0	0	79	159	49	5,45	1050
7	7,40	770	31,75	4,64	86,0	27,0	3,65	1,45	83,5	146,0	80,5	283,1	0	76	135	52	6,05	1000
8	7,55	825	10,5	8,36	22,0	7,6	0,65	0,20	103,0	140,0	77,0	510,0	0	192	624	126	0,6	800
9	7,75	5760	180,0	14,68	338,0	200,0	5,70	7,40	957,0	2800	35,0	895,0	4,9	67	12	7	6,5	200
10	7,80	5070	161,0	13,80	306,0	190,0	1,5	6,5	870,0	2300	42,0	842,0	0	6	22	12	3,9	200
11	6,90	1095	49,8	7,12	103,0	49,0	1,3	1,0	91,0	360,0	85,0	434,4	24,45	72	341	120	0,9	700
12	8,75	524	2,7	7,44	6,3	2,3	5,6	0,10	162,0	7,0	19,5	385,6	0	80	34	6	3,5	1600
13	6,95	420	16,0	3,84	36,0	16,0	24,0	0,90	58,0	74,0	42,0	234,3	19,55	62	20	13	1,9	1950
14	9,10	520	1,65	7,36	3,4	1,8	2,3	0	183,0	37,0	41,5	346,5	0	14	-de 10	4	4,4	1250
15	7,35	360	21,5	1,64	47,0	17,0	9,7	0,45	15,0	122,0	9,5	100,0	5,5	24	-de 10	4	3,0	2300
16	7,95	1877	68,5	14,56	112,0	97,0	0,75	0,35	362,0	670,0	42,0	854,0	0	103	-de 10	4	5,4	500
17	8,95	570	2,65	6,80	4,3	2,6	11,0	0,15	148,0	9,8	32,5	351,4	0	138	38	5	3,1	1600
18	6,95	3160	165	7,0	253,0	239,0	234	33,0	39,0	1200	18,5	427,0	53,75	746	62	6	5,8	500
19	6,90	5730	180	14,68	336,0	200,0	8,3	7,6	997,0	2800	35,0	895,0	178,4	41	-de 10	5	3,9	200
20	8,15	1890	51,0	14,96	72,0	71,0	1,1	0,15	435,0	600	54,4	825,0	0	36	-de 10	6	7,4	200
21	7,80	679	30,75	2,76	90,0	21,2	0,9	-de0,05	60,0	219,2	65,0	168,4	0	40	19	9	9,4	1200
22	6,80	1190	78,25	12,6	151,0	90,0	3,25	1,75	93,5	260,0	54,5	768,8	82,5	11	6	4	3,9	700
23	6,70	6506	332,0	3,76	505,0	475,0	41,0	35,0	365,0	3500,0	33,5	229,4	110,0	365	102	9	5,4	250
24	6,80	520	33,4	4,72	56,0	39,0	8,4	1,1	29,0	80,0	70,0	288,0	83,1	38	-de 10	7	5,9	1450
25	7,90	870	48,0	3,60	112,0	41,0	0,85	0	68,0	235,0	134,5	219,6	0	4	-de 10	4	7,6	900

TABLEAU N°3-2

- La résistivité de l'eau en ohms par centimètre

- Sur chaque fiche est reportée l'heure de prélèvement.

Cette heure est utile pour les eaux des ruisseaux victimes de pollutions pouvant apparaître à des heures précises. Pour toute comparaison ultérieure, le prélèvement devra donc être fait à des heures semblables.

#### II-3-2 - Eaux prélevées dans la mine

Cette deuxième série de prélèvements représentant une population beaucoup plus homogène est présentée sous forme de tableau permettant une comparaison plus facile des individus entre eux (tableau n°3-3).

Les résultats sont donnés en utilisant les mêmes unités que précédemment.

Ne sont pas mesurés : la DCO, la DBO, la résistivité et les matières en suspension.

#### II-4 - Interprétation générale des analyses d'eaux prélevées en surface

##### II-4-1 - Comparaison des échantillons

L'examen des analyses d'eaux (différentes de celles caractéristiques d'effluents domestiques ou industriels), permet de constater que, pour les eaux d'origine profonde ou bien directement influencées par la mine, les valeurs des teneurs en différents éléments sont beaucoup plus dispersées que pour les eaux de surface (Tableaux n°3-2 et 3-4).

La forte dispersion des teneurs en différents éléments (tableau n°3-5) pour les eaux dites "de mine" peut s'expliquer par la teneur en chlore qui y reste faible alors que tous les autres éléments apparaissent en quantité beaucoup plus importante, l'écart entre les teneurs extrêmes est donc accru.

Le chlore dont la teneur reste identique pour les eaux "de mine" et de surface est probablement d'origine superficielle, la valeur moyenne de la teneur en chlore est cependant supérieure à celle donnée par différents auteurs pour d'autres mines dans le monde. L'excédent est sans doute issu, d'une part des

CONCENTRATIONS EN MILLI-EQUIVALENTS/LITRES

PATH: ^MIN01>ECOLE>HYDRO>BLACHERE>ANALYSES>P.ZER.MEQ

TIME: 1984/02/03 1748:54,7

RMER 161183	12.10	570.00	7.00	1.28	3.85	0.92	0.47	1.28	1.65	2.70
ROCH 161183	8.30	475.00	7.40	3.66	4.56	2.07	1.58	2.40	0.92	2.74
RMAL 161183	23.10	372.00	7.40	2.19	2.08	1.42	0.75	0.77	0.86	1.35
RECH 161183	7.30	294.00	7.05	1.26	1.52	1.02	0.34	0.58	1.39	1.66
RPAT 161183	8.20	2200.00	7.90	17.80	19.40	5.00	11.60	13.33	8.59	10.87
ROIL 161183	10.60	710.00	7.55	5.00	5.90	2.75	2.28	3.83	1.52	4.24
ROUN 161183	11.60	770.00	7.40	6.35	4.64	4.30	2.16	3.04	2.27	3.63
RPOB 231183	7.00	825.00	7.55	2.10	8.36	1.10	0.61	2.92	2.17	4.48
RPEC 231183	21.80	5760.00	7.75	36.00	14.68	16.90	16.00	58.33	0.99	41.61
RLIZ 231183	12.40	5070.00	7.80	32.20	13.80	15.30	15.20	47.92	1.18	37.83
REGO 231183	1.10	1095.00	6.90	9.96	7.12	5.15	3.92	7.50	2.39	3.96
PFGA 231183	13.20	524.00	8.75	0.54	7.44	0.31	0.18	0.15	0.55	7.04
PFIL 231183	11.70	420.00	6.95	3.20	3.84	1.80	1.28	1.54	1.18	2.52
PDEL 241183	11.50	520.00	9.10	0.33	7.36	0.17	0.14	0.77	1.17	7.96
PCHA 241183	12.00	360.00	7.35	4.30	1.64	2.35	1.36	2.54	0.27	0.65
EXPC 241183	22.00	1877.00	7.95	13.70	14.56	5.60	7.76	13.96	1.18	15.74
EXCH 241183	21.00	570.00	8.95	0.53	6.80	0.21	0.21	0.20	0.92	6.43
EPGR 241183	14.90	3160.00	6.95	33.00	7.00	12.65	19.12	25.00	0.52	1.70
EXMA 241183	25.20	5730.00	6.90	36.00	14.68	16.80	16.00	58.33	0.99	43.35
EXPI 241183	28.00	1890.00	8.15	10.20	14.96	3.60	5.68	12.50	1.54	18.91
SNCF 161183	7.70	679.00	7.80	6.15	2.76	4.50	1.70	4.56	1.83	2.61
RESU 161183	15.90	1190.00	6.80	15.65	12.60	7.55	7.20	5.42	1.54	4.07
FEGA 241183	5.60	6506.00	6.70	66.40	3.76	25.25	38.00	72.92	0.94	15.87
RPOH 231183	4.50	520.00	6.80	6.68	4.72	2.80	3.12	1.67	1.97	1.26
AUTO 241183	11.00	870.00	7.90	9.60	3.60	5.60	3.28	4.90	3.79	2.96

Date      Temperature      E.S.      PH      T.H.      TAC      Ca      Mg      SO<sub>4</sub>      Cl      Na

EAUX PRELEVEES EN SURFACE

TABLEAU N°3-4

eaux de pluie qui se chargent en chlore au contact de l'atmosphère dans les régions industrielles, d'autre part des sols et du traitement de l'eau potable rejetée en grande quantité dans les effluents domestiques.

On remarque aussi que les eaux "de mine" se distinguent des eaux de surface par la valeur de leur minéralisation totale qui est respectivement supérieure à 35 mé/l et inférieure à 20 mé/l, pour chacune de ces "familles" d'eaux (tableau n°3-6).

Ces deux groupes s'opposent également à de l'examen de la température (à l'exception de l'eau du MALVAL minéralisée comme une eau de surface mais ayant une température de 23°C liée à l'utilisation de cette eau pour le refroidissement de la centrale thermique du BEC).

Certains échantillons présentent un déséquilibre ionique (tableau n°3-6) traduisant toujours un déficit des cations par rapport aux anions; ils sont prélevés dans des eaux polluées par des rejets domestiques, le déséquilibre est donc probablement dû à l'absence de dosage de  $\text{NH}_4^+$  toujours présent en quantité non négligeable dans les rejets domestiques, ainsi que les ions phosphate ( $\text{PO}_4^+$ ) issus des lessives (citons par exemple, le MERDANT, le PATEUX, la POMMARAISE, l'ONDAINE).

On constate d'autre part, que la quantité de Calcium (en mé/l) est plus grande que la quantité de Magnésium dans les eaux d'origine superficielle, ce rapport s'inverse dans les eaux de mine.

Le Fer et le Manganèse n'apparaissent en quantité non négligeable que dans les eaux "de mine".

Au contact de l'encaissant Stéphanien, essentiellement constitué de schistes, de grès et de charbon, les eaux se chargent en ions issus de la dissolution des minéraux (quartz, plagioclases, biotite, hématite, argiles, pyrite, calcite).

L'influence des variations de la température, de la pression et du PH vis à vis de la solubilité des minéraux peut expliquer certaines variations dans les rapports entre certains cations ou certains anions. De même, lorsque le temps de transit de ces eaux est suffisant, il se produit des échanges de bases entre les cations des argiles et les cations contenus dans l'eau, ce qui provoque de nouvelles modifications de teneurs.

## DISPERSION DES VALEURS EN CONCENTRATIONS

ECHANT.	MIN.	MAX.	DISPERSION	
1	RMER	0,47	3,85	3,38
2	ROCH	0,92	4,56	3,64
3	RMAL	0,75	2,19	1,44
4	RECH	0,34	1,66	1,32
5	RPAT	5,00	19,40	14,4
6	ROIL	1,52	5,90	3,62
7	ROUN	2,16	6,35	4,19
8	RPOB	0,61	8,36	7,75
9	RPEC	0,99	58,33	57,34
10	RLIZ	1,18	47,92	36,65
11	REGO	2,39	9,96	7,57
12	PFGA	0,15	7,44	7,29
13	PFIL	1,18	3,84	2,66
14	PDEL	0,14	7,96	7,82
15	PCHA	0,27	4,30	4,03
16	EXPC	1,18	15,74	14,56
17	EXCH	0,20	6,80	6,60
18	EPGR	0,52	33,00	32,48
19	EXMA	0,99	58,33	57,34
20	EXPI	1,54	18,91	17,37
21	SNCF	1,70	6,15	4,45
22	RESU	1,54	15,65	14,11
23	FEGA	0,94	66,40	65,46
24	RPOH	1,26	6,68	5,42
25	AUTO	2,96	9,6	6,64
W	DISPERS			

TABLEAU N°3-5

## CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE

PATH: ^MINO1&gt;ECOLE&gt;HYDRO&gt;BLACHERE&gt;ANALYSES&gt;P.ZER.Z

TIME: 1984/02/03 1749:50.1

RMER	161183	4.088	6.781	10.869	-2.694
ROCH	161183	6.394	7.875	14.270	-1.481
RMAL	161183	3.516	3.706	7.222	-0.190
RECH	161183	3.023	3.498	6.521	-0.475
RPAT	161183	27.470	41.325	68.794	-13.855
ROIL	161183	9.269	11.254	20.524	-1.985
ROUN	161183	10.090	9.949	20.040	0.141
RPOB	231183	6.186	13.446	19.632	-7.259
RPEC	231183	74.509	73.999	148.508	0.509
RLIZ	231183	68.326	62.900	131.226	5.426
REGO	231183	13.027	17.014	30.041	-3.988
PFGA	231183	7.542	8.135	15.678	-0.593
PFIL	231183	5.602	6.565	12.166	-0.963
PDEL	241183	8.271	9.300	17.570	-1.029
PCHA	241183	4.362	4.449	8.811	-0.087
EXPC	241183	29.099	29.701	58.801	-0.602
EXCH	241183	6.858	7.920	14.777	-1.062
EPGR	241183	33.466	32.521	65.987	0.945
EXMA	241183	76.148	73.999	150.147	2.149
EXPI	241183	28.193	28.995	57.188	-0.802
SNCF	161183	8.805	9.153	17.958	-0.349
RESU	161183	18.815	19.552	38.367	-0.737
FEGA	241183	79.120	77.620	156.740	1.499
RPOH	231183	7.181	8.358	15.539	-1.178
AUTO	241183	11.837	12.285	24.121	-0.448
		ions +	ions -	(+)+(-)	(+)-(-)

TABLEAU N°3-6

## II-4-2 - Analyse en composantes principales

### II-4-2-1 - Présentation de la méthode

L'analyse en composantes principales (A.C.P.), a un but essentiellement descriptif et permet de représenter les relations entre un grand nombre de variables et d'apprécier la similitude éventuelle de plusieurs observations.

Son principe général (P.BERTIER, J.M.BOUROCHE 1975) est basé sur la recherche de l'espace de dimension minimale qui donne l'image la plus exacte possible du nuage de répartition initial centré des N individus dans l'espace engendré par les variables. Pour ce faire, l'algorithme recherche les axes principaux de déformation du nuage puis caractérise et interprète chacun d'eux par les variables qui font un angle minimal avec lui.

Cette méthode détermine les facteurs principaux  $a_1, \dots, a_k$  ou combinaisons linéaires des variables initiales. Le calcul du coefficient de corrélation entre les variables et les facteurs permet d'évaluer la contribution de chaque variable sur les axes principaux et l'interprétation de chacun d'eux.

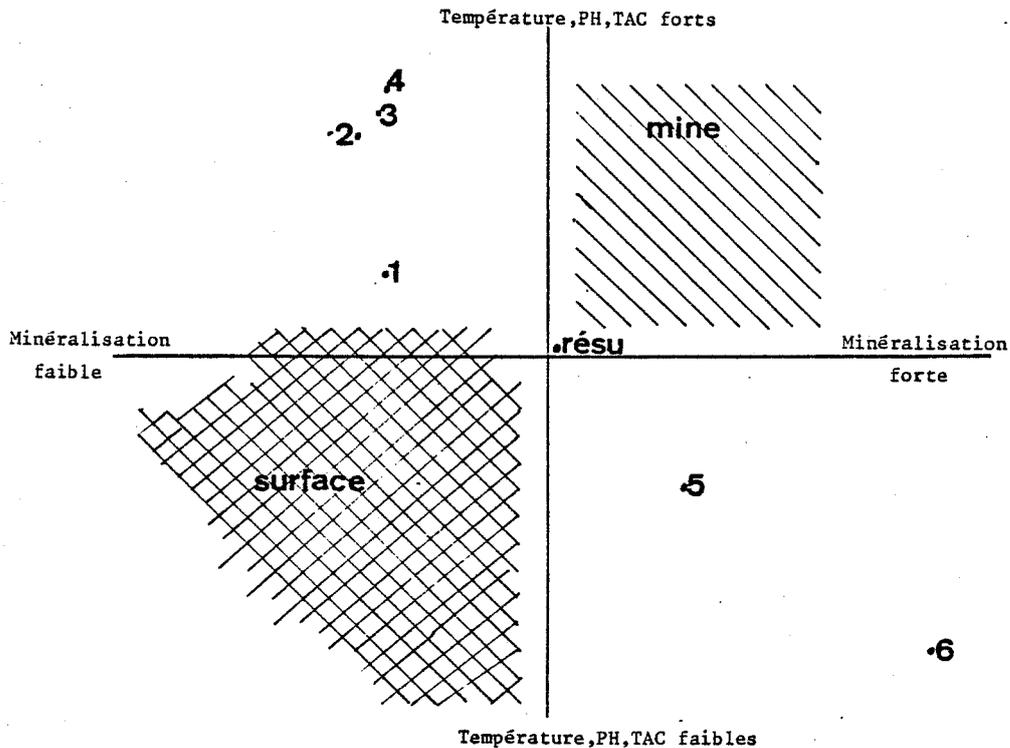
### II-4-2-2 - Interprétation des résultats

Il ressort de cette analyse (tableau n°3-7) que l'axe principal, c'est-à-dire celui représentant la combinaison de variables ayant la plus forte variance pour la population étudiée, correspond à la minéralisation totale.

Selon cet axe (figure n°3-8), les eaux de surface se distinguent des eaux profondes ou influencées par la mine, par une minéralisation plus faible.

L'axe perpendiculaire au précédent et doté d'un pouvoir de discrimination significatif, correspond à l'association de la température, du T.A.C. et du PH dont les valeurs sont en général élevées pour les eaux "de mine".

Le diagramme de cette analyse statistique présente la configuration suivante :



On remarquera que l'outil statistique utilisé confirme certaines observations déjà effectuées lors de l'examen des résultats d'analyses, notamment l'influence de la minéralisation totale et de la température. Cette méthode s'avère donc fiable et nous permet de procéder à une interprétation plus détaillée.

Certains échantillons se distinguent de leur groupes respectifs:

- 1. Echantillon n°3 : ruisseau le Malval, distingué par sa température.
- 2.3.4. Echantillons n°12, 14 et 17 : piézomètres Firminy gare et cité Delaynaud (La Ricamarie) ainsi que l'eau d'exhaure du puits de la Chana . Pour tous ces échantillons on observe une minéralisation totale faible en relation avec un PH et un T.A.C. proportionnellement élevés (cette relation peut s'expliquer par une précipitation des carbonates due à la forte valeur du PH).
- 5.6. Echantillons n° 18 et 23 : Eaux du puits des Granges n°3 et de la fendue des Egassons, sont toutes deux des eaux de surface subissant une influence minière soit par la proximité d'un terril (fendue des Egassons) soit par un temps de séjour dans un puits de mine .

RESULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES  
EAUX PRELEVEES EN SURFACE

FIGURE N°3-7

MATRICE DE CORRELATIONS

	TEMP	E.S.	PH	TAC	CA	MG	SO4	CL	NA
TEMP	1.0000								
E.S.	0.2522	1.0000							
PH	0.2931	-0.2049	1.0000						
TAC	0.4419	0.5011	0.2199	1.0000					
CA	0.1152	0.9564	-0.3577	0.3345	1.0000				
MG	0.0552	0.9022	-0.3292	0.3286	0.9477	1.0000			
SO4	0.2127	0.9924	-0.2399	0.4116	0.9635	0.9043	1.0000		
CL	-0.2895	-0.0643	0.0583	0.3822	-0.0960	-0.0008	-0.1177	1.0000	
NA	0.4868	0.8380	0.0798	0.6783	0.6819	0.5389	0.8140	-0.0810	1.0000

CONTRIBUTION DES FACTEURS A LA VARIANCE DES VARIABLES

	TEMP	E.S.	PH	TAC	CA	MG	SO4	CL	NA
	10.4689	98.6154	-4.2005	31.8952	89.4402	79.1317	95.9622	-0.3590	73.3246
	47.6634	-0.3392	59.7595	38.1908	-7.7683	-9.5700	-1.6729	1.4780	13.6741
	-20.4822	0.0008	-0.0379	16.6992	-0.0133	0.8066	-0.2418	92.3161	-0.4030
	12.1894	-0.5920	-35.2063	4.6508	-0.5334	-1.3900	-1.1464	0.4331	0.0011
	-8.0330	0.0269	-0.7761	0.9870	-0.5723	-7.1832	0.0816	-1.7092	10.3431
	-1.1627	-0.1292	0.0081	7.5637	-0.0002	1.4753	-0.5966	-3.7042	-2.1383
	-0.0004	0.0585	-0.0114	-0.0069	-1.6697	0.3433	0.1676	-0.0003	0.0111
	-0.0000	-0.1858	-0.0001	-0.0033	0.0023	0.0930	-0.0153	0.0000	0.0961

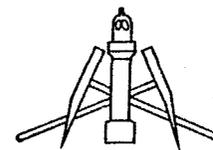
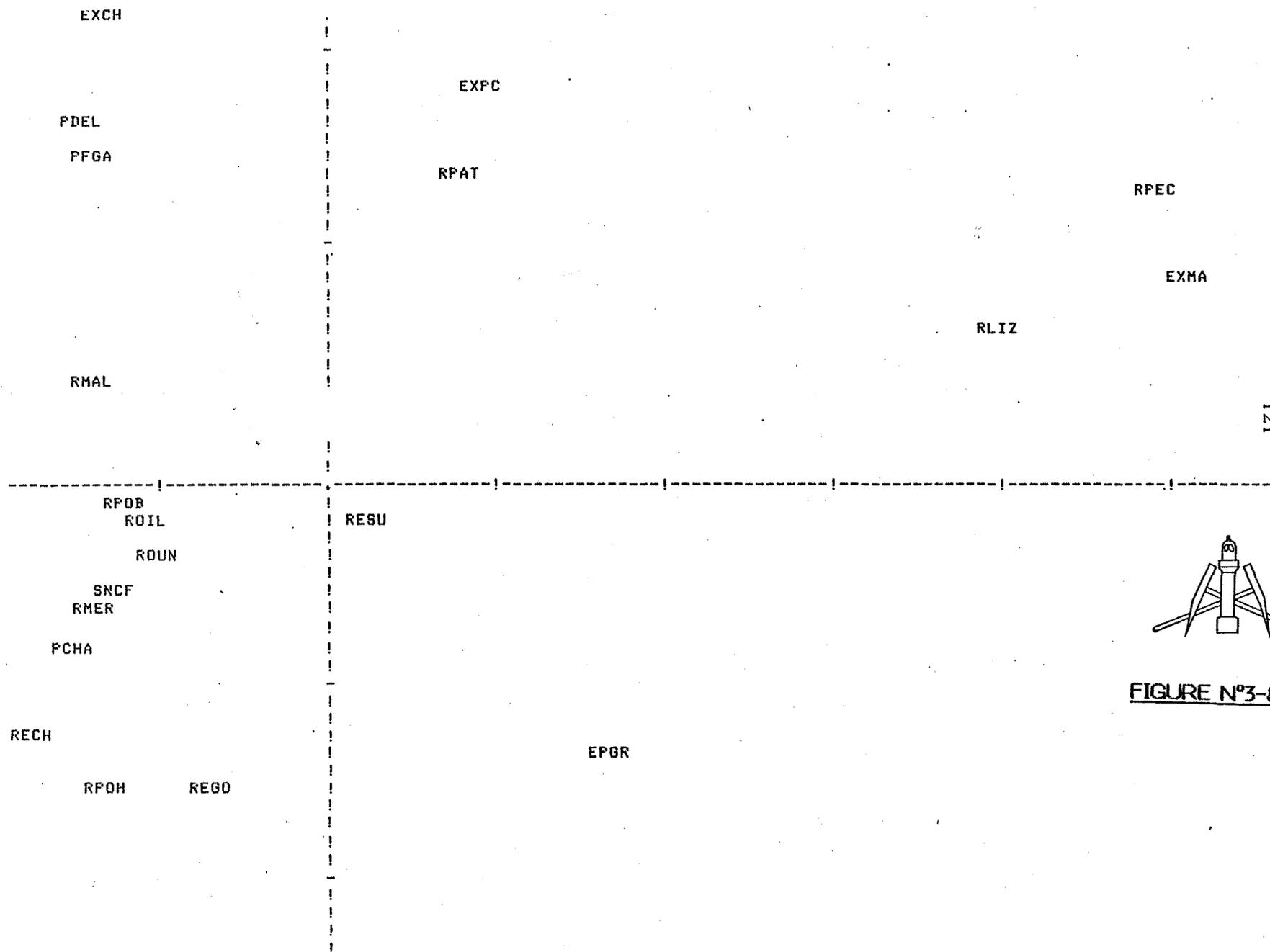


FIGURE N°3-8

EAUX PRELEVEES EN SURFACE

Notons que l'eau de l'émergence localisée dans l'Ondaine se situe sur le graphe dans une position intermédiaire traduisant un mélange des eaux profondes avec les eaux de surface.

L'analyse de ces facteurs (minéralisation, PH, T.A.C., et température) explique au total 78,5% de l'information recueillie sur la population.

Le 3° axe, perpendiculaire au plan défini par les deux précédents n'apporte que peu d'information, il exprime l'influence des teneurs en ions Cl<sup>-</sup> et permet de distinguer l'eau du ruisseau le Pateux très chargée en Chlore dont la présence est liée à l'influence de la décharge d'ordures ménagères.

La matrice de corrélation reliant entre elles les diverses variables étudiées montre un coefficient de corrélation négatif très faible (-8%) entre les ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>. La source de ces ions semble donc différente ce qui confirme l'origine superficielle du Chlore et l'apport de Sodium lors du transit des eaux dans le terrain. Ce transit provoque au contraire une forte corrélation positive (80% à 99%) entre l'extrait sec, les ions Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (les cations Mg<sup>++</sup> et Ca<sup>++</sup> varient en sens inverse de Na<sup>+</sup>).

#### II-4-3 - Représentation diagrammatique des analyses

Parmi les nombreuses représentations possibles, nous utiliserons celles de PIPER et de SCHOELLER-BERKALOFF. Ces diagrammes permettent de traiter différentes eaux afin de distinguer plusieurs facies chimiques.

##### II-4-3-1 - Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF.

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est une représentation graphique d'une analyse chimique exprimée en milliéquivalents par litre sur un diagramme d'échelle semi-logarithmique : sur l'axe des abscisses sont disposés à intervalle régulier et successivement de gauche à droite les teneurs suivantes Ca, Mg, Na, Cl, SO<sub>4</sub>, T.A.C., TH; et sur l'axe des ordonnées, gradué suivant une échelle logarithmique, le nombre de milliéquivalents de chacun des éléments (H.SCHOELLER 1962).

La représentation graphique des analyses chimiques sur ce diagramme montre que les eaux profondes ou bien influencées par la mine,

présentent des faciès très différents de ceux des eaux de surface.

Le tracé des analyses chimiques des eaux de surface est beaucoup plus régulier que celui correspondant aux eaux "de mine" (figure n°3-9) pour lesquelles la dispersion des valeurs de concentration en différents éléments est plus forte.

L'interprétation de ces diagrammes confirme les résultats de l'A.C.P., à savoir que les eaux de surface et "de mine" se différencient par leur minéralisation totale et que, les diagrammes n'étant en rien parallèles, une évolution chimique intervient au fur et à mesure qu'une eau s'infiltré et circule dans les terrains.

Cependant le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF permet d'affiner la comparaison des individus dans leur groupe respectif.

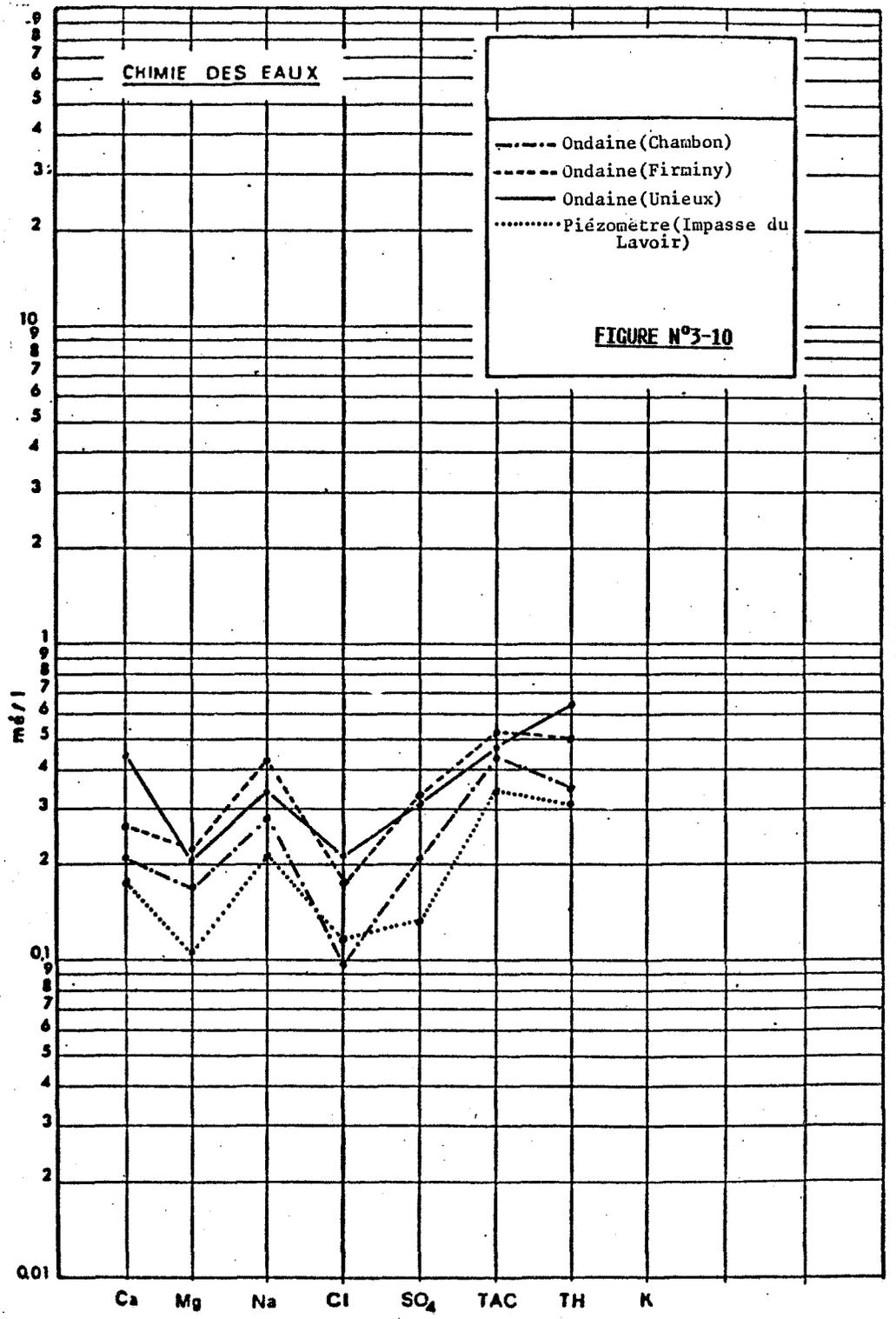
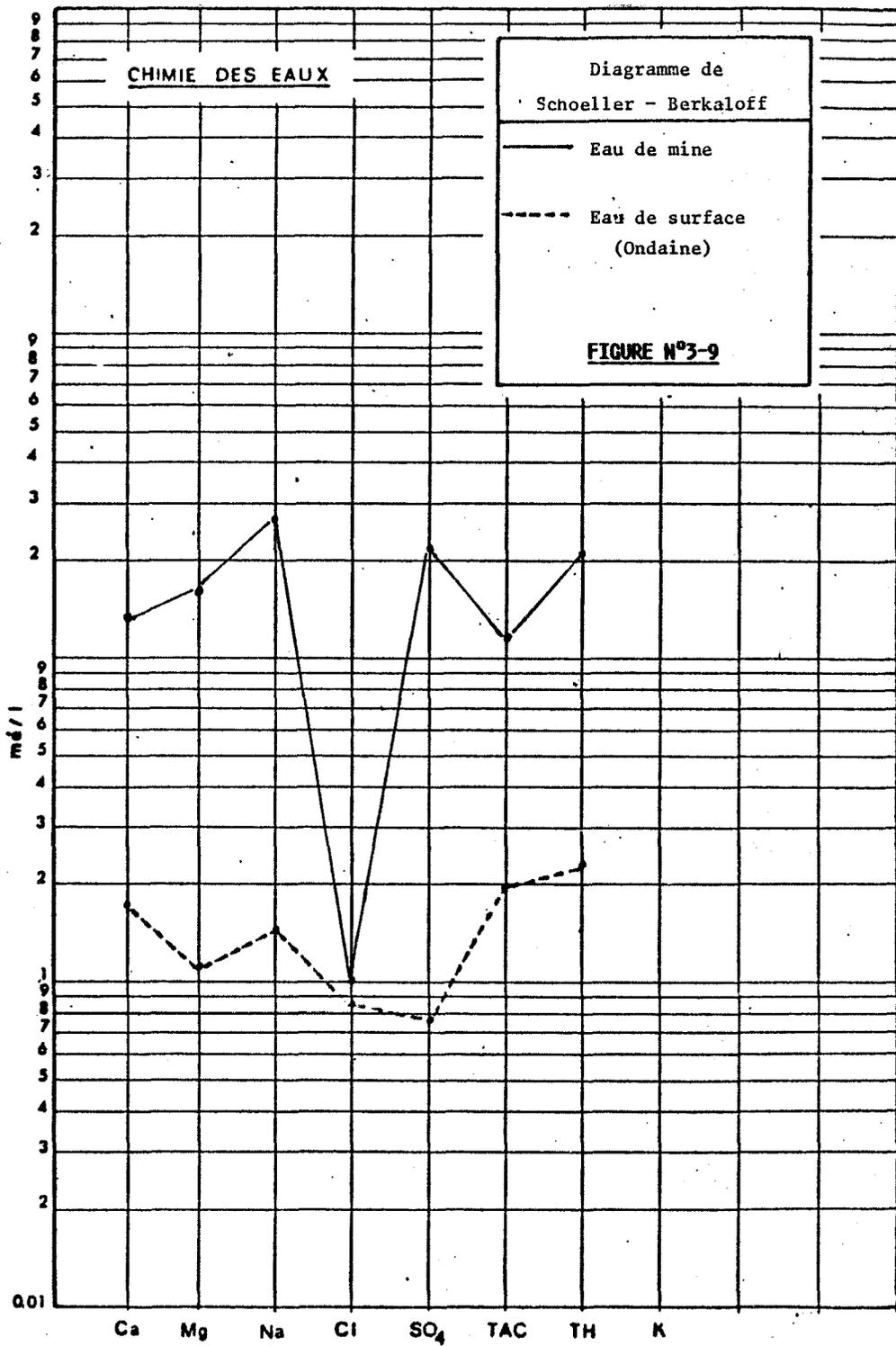
C'est ainsi que l'on peut constater que l'Ondaine (figure n°3-10) possède une composition chimique assez stable du Chambon-Feugerolles à Unieux (même en aval de la résurgence) et présente un faciès analogue à celui du piézomètre implanté impasse du Lavoir à Firminy (l'eau du piézomètre appartient donc probablement à la nappe alluviale de l'Ondaine toute proche); l'eau de refroidissement de la centrale thermique du BEC, rejetée dans le Malval présente aussi ce faciès.

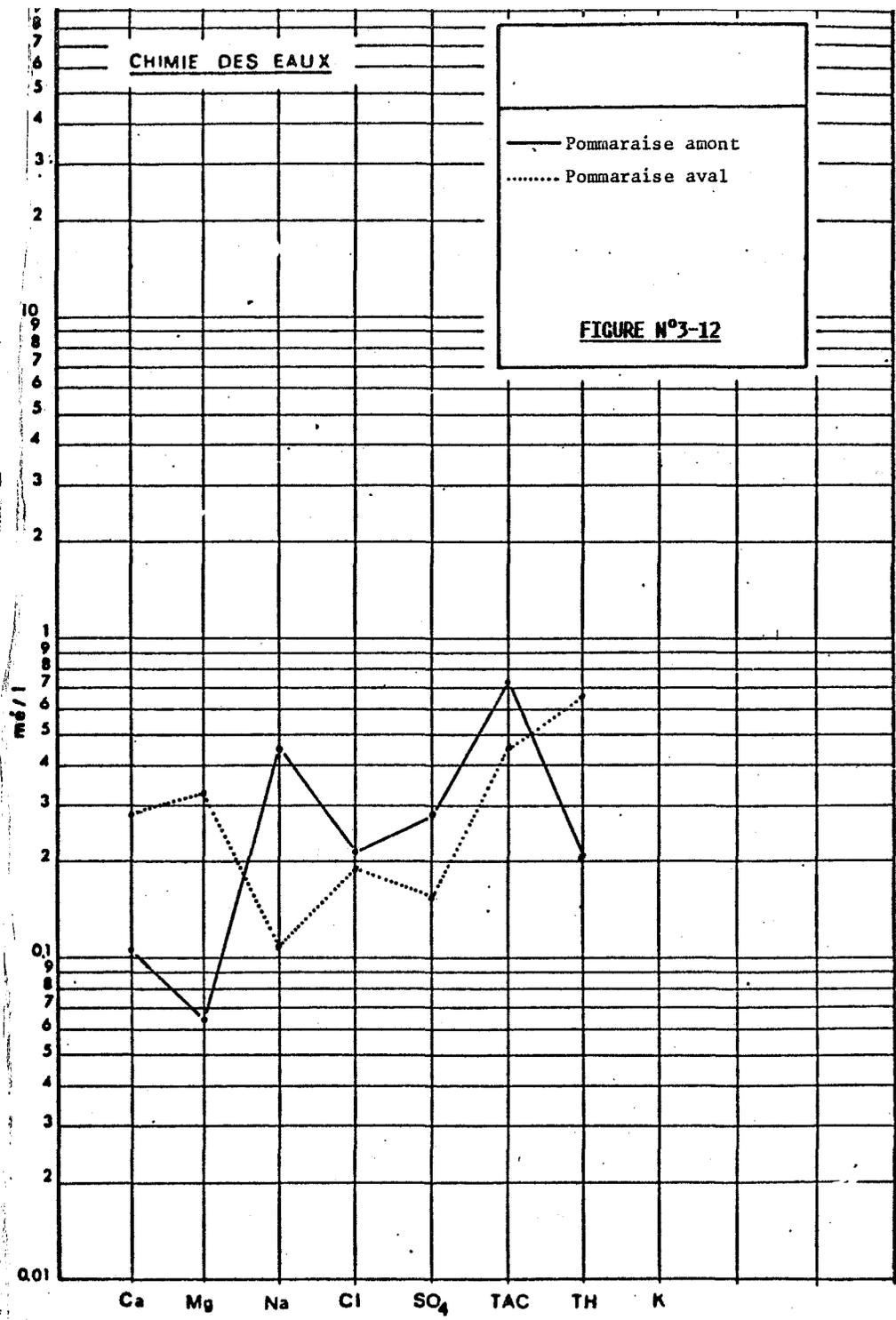
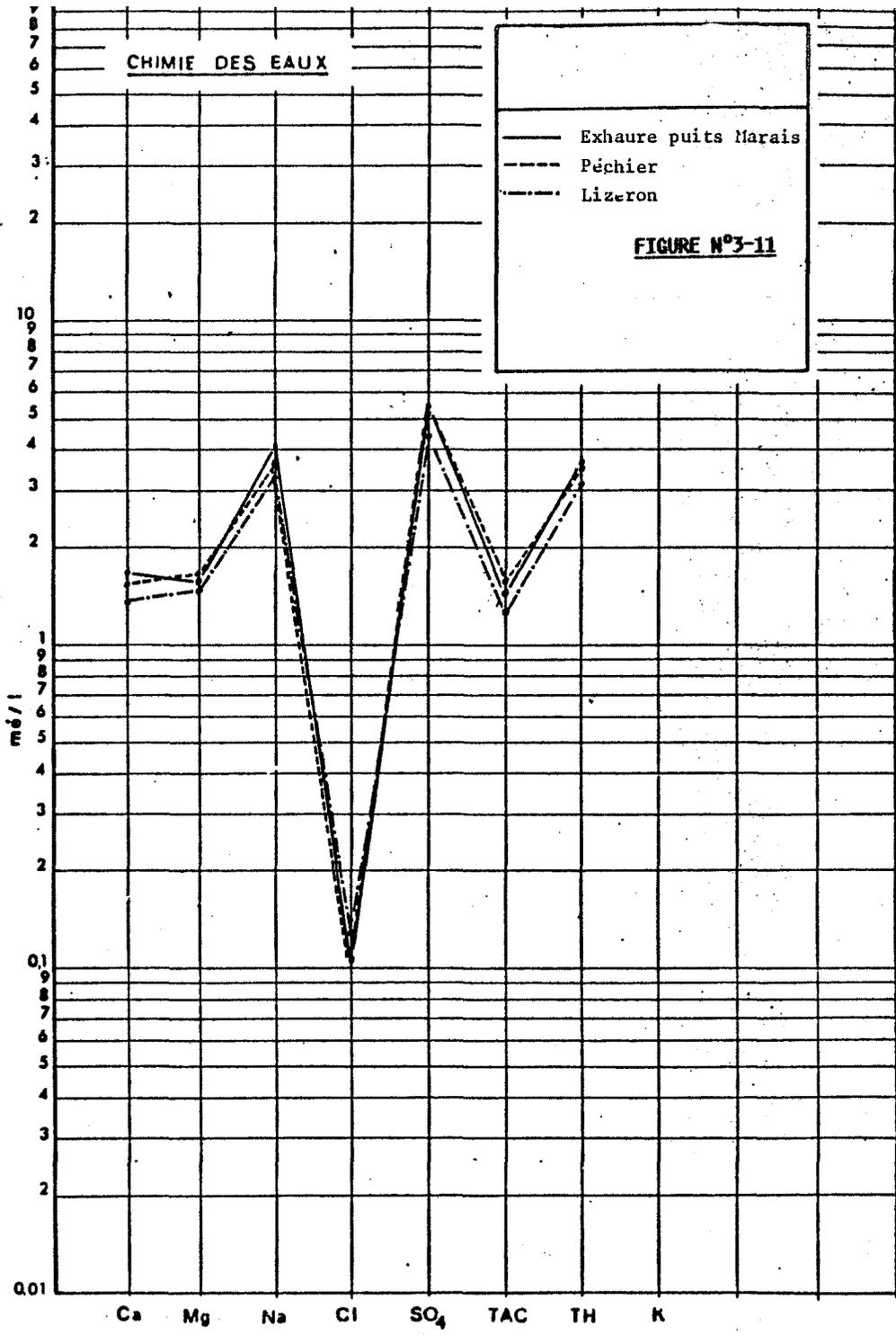
D'autres échantillons se regroupent ainsi, citons par exemple l'eau du puits du Marais à Roche-la-Molière (figure n°3-11) qui confère aux eaux du Péchier et du Lizeron leur composition hydrochimique car elle représentait l'essentiel du débit d'écoulement de ces deux ruisseaux au moment des prélèvements avant arrêt de l'exhaure minière.

Par contre, on constate que la Pommaraise (figure n°3-12) change complètement de faciès entre l'amont et l'aval, changement sans doute dû à des rejets industriels peu dilués en raison de son faible débit.

#### II-4-3-2 - Diagramme de PIPER

Il est difficile de déterminer un faciès eau de surface, ou un faciès eau "de mine" à partir du diagramme obtenu, dans la mesure où tous les points sont une position relativement centrale dans le losange de PIPER.





On peut cependant constater que les eaux de surface semblent plutôt bicarbonatées calciques ou magnésiennes, alors que les eaux de mine apparaissent en générale plutôt sulfatées sodiques (figure n°3-13).

La distinction se fait peut-être mieux si l'on considère indépendamment les cations et les anions:

- Les cations dominants dans les eaux de surface sont  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ .
- Dans les eaux "de mine" le sodium apparait plus important alors que le pourcentage de calcium diminue.
- Au niveau des anions les eaux de mine se localisent toutes dans la zone de faible pourcentage de chlore.

Toutes ces observations viennent confirmer certaines constatations faites au moyen de diverses autres méthodes.

#### II-4-4 - CONCLUSIONS

Il ressort de l'étude de ces analyses chimiques par différentes méthodes d'interprétation graphiques ou statistiques, que la distinction entre les eaux de surface et les eaux de mine (ou les eaux directement influencées par la mine) peut se faire à partir de divers paramètres :

Ces paramètres sont la température, la concentration totale, le T.A.C. ainsi que la présence de Fer et de Manganèse dont les valeurs sont élevées pour les eaux de mine.

Les comparaisons intéressantes à signaler concernent la dispersion des valeurs de concentration des éléments dosés pour un même individu; les teneurs en ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  dont le rapport s'inverse pour les deux groupes d'eaux déterminés, ainsi que la teneur en sodium qui prend une importance prépondérante dans les eaux de mine et l'origine uniquement superficielle du chlore.

S.C. TURBAK (1979), en comparant des eaux de surface et des eaux d'exhaure minière dans le sud du Montana (U.S.A.), constate aussi les mêmes inversions dans les teneurs en différents cations.

Enfin, il est difficile d'établir un classement entre les eaux de surface qui présentent toutes des faciès très différents sans doute liés à des



pollutions d'origines diverses; on peut simplement constater comme D.A. HACKBARTH (1979) dans son étude comparée de la qualité des cours d'eau affectés ou non par une activité minière dans les montagnes Rocheuses (Canada), que la minéralisation est plus importante pour les cours d'eau affectés par une activité minière (exhaure, lessivage des charbons, terrils etc...), et que pour les eaux situées en dehors d'une zone minière, les ions dominants sont le calcium, le magnésium, puis les bicarbonates.

#### II-5 - Etude des analyses des eaux provenant de la mine

Après avoir établi, par l'étude précédente, une distinction entre les eaux de surface et les eaux de mine, nous tenterons, ici, par les mêmes approches de déterminer les critères de distinction entre les eaux provenant de différentes concessions de la mine et de définir quelle peut être l'évolution qualitative de l'eau lors du remplissage des travaux miniers.

##### II-5-1 - Approche générale, comparaison des individus.

La consultation du tableau des données calculées en milli-équivalents par litre (tableau n°3-14) permet immédiatement de distinguer les eaux retenues derrière des serrements par leur minéralisation totale (environ 130 mé/1) (tableau n°3-15) et leur PH (8,39 et 9,72) très forts. Elles contiennent en outre des teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  (35 et 40,80 mé/1) et  $\text{Na}^+$  (65 et 67 mé/1) très élevées, mais leurs teneurs en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  sont exceptionnellement faibles (inférieures à 1,2 mé/1).

L'eau d'exhaure du puits du Marais de Roche-la-Molière se distingue aussi par sa minéralisation très forte (minéralisation totale:166 mé/1).

Nous examinerons ultérieurement l'origine de ces différents faciès.

Notons que les teneurs en chlore restent du même ordre de grandeur que celles des eaux de surface (1 mé/1) et qu'elles ne varient pas avec la profondeur ce qui semble confirmer l'origine uniquement superficielle du chlore.

Pour la plupart des échantillons la teneur en calcium en mé/1 est inférieure à la teneur en magnésium, d'autre part, on constate que le rapport

## RESULTATS DES ANALYSES D'EAUX DE MINE (mg/l)

PIGEOT	Date	T.	E.S.	PH	TH	T.A.C.	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO <sub>4</sub>	Cl	CO <sub>3</sub> H	CO <sub>2</sub>
T.B. Marseille -220m.	31-03-83	20	1480	7,96	79	4,8	148	173	8	0,5	83	651	38	293	3
T.B. Bessy -220 (bassins vers 8° Gruner)	31-03-83	35	1920	7,28	62	17,8	96	92	10	0,5	289	297	36	1086	12
Reservoirs salle des pompes -220	31-03-83	26	1620	7,86	43	9,5	64	66	12	1	301	511	54	579	6
Base plan Devillaine -265	31-03-83	34	2200	7,39	45	16	72	66	2	0	464	589	32	976	8
T.B. Bouchage -320 (vers barrage)	15-04-83	35	1990	7,69	29	16,5	56	36	4	0	446	334	65	1006	7
T.B. Lyon -320 (vers barrage)	15-04-83	38	2230	8,02	30	19,4	60	36	3	0	455	276	19	1183	/
T.B. Bessy -320 (vers 8° Gruner)	25-03-83	36	1690	7,36	27	12,8	48	36	8	1	336	363	36	781	10
Reservoir salle des pompes -320	15-04-83	27	1720	8,09	42	10,4	64	62	2	1	330	560	27	634	/
Serrement T.B. Couriot -320 (fuites)	25-03-83	44	4890	8,39	8	35	8	15	2	0	1495	1129	76	2135	0
Eau d'exhaure Pigeot (galerie -7m)	28-04-83	28	1880	8,02	44	12,2	16	97	1	1	377	560	48	744	8
COMBES															
Salle des pompes réservoir 355	24-03-83	21	1990	7,3	110	6,2	212	139	12	2	105	919	42	378	10
Dans le puits cote 352	24-03-83	22	2530	7,2	128	9,2	256	156	6	1	202	1174	25	561	12
Eau d'exhaure des Combes (galerie 590)	16-02-83	22	1640	7,65	105	2,48	240	1081	7	2	48	931	45	151	0
VARENNE															
Puits Chana cote 350	06-04-83	18	1490	7,54	88	12	184	102	3	0,5	102	346	28	732	9
T.B. Isaac cote 100 (vers barrage)	06-04-83	20	1290	7,00	73	5,7	178	100	2	0,5	32	560	30	347	8
T.B. Bouchage cote 100 (vers barrage)	06-04-83	20	1250	7,38	80	7,5	144	107	2	0	46	461	31	457	12
Salle des pompes cote 100 (dans bassins)	06-04-83	20	1320	7,36	80	8,3	152	102	1	0	68	482	43	506	18
Serrement Charles-Gruner cote 11 (fuites)	06-04-83	23	5410	9,72	5,4	40,8	5	10	12	2	1541	1176	144	2488	/
Puisard Chana aval -136	06-04-83	30	2190	8,89	46	3,5	52	80	15	1	354	890	54	70	/
Eau d'exhaure Chana (jour)	06-04-83	21	1270	7,37	83	8,1	180	92	6	1	14	412	17	494	16
BERLAN															
Niveau S14 vers gaine d'aerage	12-04-83	11	1896	7,75	131	5	276	151	2	2	46	1112	7	305	10
Pompes cote 425	12-04-83	15	2280	7,75	84	4,8	150	107	1	1	370	1302	28	293	8
ROCHE-LA-MOLIERE															
Eau d'exhaure du Marais (jour)	23-03-83	26	5890	7,36	177	14,4	348	230	4	0,1	1100	3251	40	878	14

TABLEAU N°3-3

CONCENTRATIONS EN MILLI-EQUIVALENTS /LITRE

PATH: ^MIN01>ECOLE>HYDRO>BLACHERE>ANALYSES>CHIMFONDER

TIME: 1984/02/03 1747:49.4

FMA1	310383	20.00	1480.00	7.96	15.80	4.80	7.40	13.84	13.56	1.07	3.61
FBE2	310383	35.00	1920.00	7.28	12.40	17.80	4.80	7.36	6.19	1.01	12.57
FRP1	310383	26.00	1620.00	7.86	8.60	9.50	3.20	5.28	10.65	1.52	13.09
FPD1	310383	34.00	2200.00	7.39	9.00	16.00	3.60	5.28	16.44	0.90	20.17
FTB1	150483	35.00	1990.00	7.69	5.80	16.50	2.80	2.88	6.96	1.83	19.39
PTL1	150483	38.00	2230.00	8.02	6.00	19.40	3.00	2.88	5.75	0.54	19.78
PBE1	250383	36.00	1690.00	7.36	5.40	12.80	2.40	2.88	7.56	1.01	14.61
FR12	150483	27.00	1720.00	8.09	8.40	10.40	3.20	4.96	11.67	0.76	14.35
PEX1	280483	28.00	1880.00	8.02	8.80	12.20	0.80	7.76	11.67	1.35	16.39
CRP1	240383	21.00	1990.00	7.30	22.00	6.20	10.60	11.12	19.15	1.18	4.57
CFU1	240383	22.00	2530.00	7.20	25.60	9.20	12.80	12.48	24.46	0.70	8.78
CEX1	240383	22.00	1780.00	7.50	19.00	8.60	9.40	9.28	15.71	1.24	7.39
VPU1	060483	18.00	1490.00	7.54	17.60	12.00	9.20	8.16	7.21	0.79	4.43
VTI1	060483	20.00	1290.00	7.00	14.60	5.70	8.90	8.00	11.67	0.85	1.39
VTB1	060483	20.00	1250.00	7.38	16.00	7.50	7.20	8.56	9.60	0.87	2.00
VSP1	060483	20.00	1320.00	7.36	16.00	8.30	7.60	8.16	10.04	1.21	2.96
VPA1	060483	30.00	2190.00	8.89	9.20	3.50	2.60	6.40	18.54	1.52	15.39
VEX1	060483	21.00	270.00	7.37	16.60	8.10	9.00	7.36	8.58	0.48	0.61
BNI1	120483	11.00	1896.00	7.75	26.20	5.00	13.80	12.08	23.17	0.20	2.00
BPD1	120483	15.00	2280.00	7.75	16.80	4.80	7.50	8.56	27.12	0.79	16.09
FMA2	120183	19.50	1560.00	7.99	17.80	4.60	10.40	6.72	16.04	0.96	4.78
FMA4	120183	24.50	3050.00	7.50	11.40	16.20	7.75	5.04	18.10	6.08	28.70
PTL2	120183	39.00	3010.00	7.82	5.60	31.80	2.60	2.96	3.96	1.13	33.91
FMA3	120183	19.00	1760.00	7.90	17.00	4.40	8.00	8.72	19.23	0.99	7.39
FSTC	250383	44.00	4890.00	8.39	1.60	35.00	0.40	1.20	23.52	2.14	65.00
VSCG	060483	23.00	5410.00	9.72	1.08	40.80	0.25	0.80	24.50	4.06	67.00
MVEX	230383	26.00	5890.00	7.36	35.40	14.40	17.40	18.40	67.73	1.13	47.83
ROND	151183	15.90	1190.00	6.80	15.65	12.60	7.55	7.20	5.42	1.54	4.07
RCL1	111111	16.00	2204.00	6.82	21.40	14.50	11.20	9.84	18.92	1.18	
RVI1	111111	19.00	2950.00	6.80	25.20	21.50	9.40	15.36	24.81	1.07	
RMA1	111111	16.00	1512.00	6.84	21.80	6.70	7.80	13.60	13.37	2.25	
RTA1	111111	16.00	2682.00	6.60	23.80	11.90	4.20	19.04	29.44	0.90	
		T°	E.S.	PH	TH	TAC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>

EAUX DE MINE

TABLEAU N°3-14

CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE DES EAUX DE MINE

PATH: ^MIN01>ECOLE>HYDRO>BLACHERE>ANALYSES>CHIMI.Z

TIME: 1984/02/03 1747:00.9

PMA1	310383	24.849	19.433	44.282	5.416
PBE2	310383	24.725	25.002	49.727	-0.276
PRP1	310383	21.567	21.667	43.234	-0.100
PPD1	310383	29.054	33.339	62.393	-4.285
PTB1	150483	25.071	25.289	50.361	-0.218
PTL1	150483	25.663	25.685	51.348	-0.023
PBE1	250383	19.889	21.377	41.265	-1.488
PR12	150483	22.508	22.827	45.335	-0.319
PEX1	280483	24.951	25.219	50.170	-0.267
CRP1	240383	26.285	26.529	52.814	-0.244
CPU1	240383	34.063	34.363	68.425	-0.300
CEX1	240383	26.071	25.548	51.619	0.524
VP1	060483	21.795	19.997	41.792	1.798
VTI1	060483	18.291	18.212	36.503	0.080
VTB1	060483	17.760	17.977	35.737	-0.217
VSP1	060483	18.717	19.553	38.269	-0.836
VPA1	060483	24.391	23.563	47.954	0.829
VEX1	060483	16.969	17.162	34.131	-0.194
BNI1	120483	27.880	28.364	56.244	-0.484
BFO1	120483	32.147	32.714	64.861	-0.567
PMA2	120183	21.903	21.599	43.502	0.303
PMA4	120183	41.486	40.389	81.874	1.097
PTL2	120183	39.473	36.885	76.358	2.588
PMA3	120183	24.111	24.615	48.726	-0.504
PSTC	250383	66.600	60.662	127.262	5.938
VSCG	060483	68.050	69.356	137.406	-1.306
MVEX	230383	83.626	83.256	166.882	0.370
ROND	151183	18.815	19.552	38.367	-0.737
RCL1	111111	31.018	34.600	65.618	-3.581
RVI1	111111	34.738	47.383	82.121	-12.645
RMA1	111111	31.378	22.329	53.707	9.050
RTA1	111111	33.218	42.239	75.457	-9.021
		ions +	ions -	(+)+(-)	(+)-(-)

TABEAU N°3-15

	Provenance	Na
		Ca + Mg
PMA1	T.B. Marseille -220 m.	0,169
PBE2	T.B. Bessy -220 m. (bassins vers 8° Gruner)	1,033
PRP1	Reservoirs salle des pompes -220 m.	1,543
PPD1	Base plan Devillainé -265 m.	2,271
PTB1	T.B. Bouchage -320 m. (vers barrage)	3,413
PTL1	T.B. Lyon -320 m. (vers barrage)	3,363
PBE1	T.B. Bessy -320 m. (vers 8° Gruner)	2,767
PR12	Reservoirs salle des pompes -320 m.	1,758
PEX1	Eau d'exhaure Pigeot (galerie -7 m.)	1,914
CRP1	Salle des pompes réservoir 355 m.	0,210
CPU1	Dans le puits cote 352 m.	0,347
CEX1	Eau d'exhaure des Combes (galerie 590 m.)	0,395
VP1	Puits Chana cote 350 m.	0,255
VTI1	T.B. Isaac cote 100 m. (vers barrage)	0,082
VTB1	T.B. Bouchage cote 100 m. (vers barrage)	0,126
VSP1	Salle des pompes cote 100 m. (dans bassins)	0,187
VPA1	Puisard Chana aval -136 m.	1,710
VEX1	Eau d'exhaure Chana (jour)	0,037
BNI1	Berlan niveau 514 vers gaine d'aérage	0,077
BPO1	Berlan Pompes cote 425 m.	1,001
PMA2	T.B. Marseille -220 m.	0,279
PMA4	T.B. Marseille -320 m.	2,242
PTL2	T.B. Lyon -320 m.	6,098
PMA3	T.B. Marseille -220 m.	0,441
PSTC	Serrement T.B. Couriot -320 m. (fuites)	40,625
VSCG	Serrement Charles-Gruner cote 11 (fuites)	63,809
MVEX	Eau d'exhaure puits du Marais (Roche-la-Molière)	1,336

TABEAU N°3-16

Na(mé/1) / Ca + Mg (mé/1) (tableau n°3-16) constitue un bon critère de distinction :

- Il est inférieur à 1 pour des eaux de provenance peu profonde
- Il devient supérieur à 1 pour des eaux plus profondes
- Il atteint des valeurs de 40 à 63 pour les eaux de serrement

S.G. TURBAK (1979) utilise dans son étude un rapport du même type  $(Na^+ / (Ca^{++} + Mg^{++} / 2)^{\frac{1}{2}})$  appelé SAR (sodium absorption Ratio) ; ce type de rapport augmente avec l'importance des échanges cationiques avec le terrain.

La température accroit avec la profondeur d'origine de l'eau exception faite des eaux du puits du Marais de Roche-la-Molière provenant de la cote +430 NGF (moins de 100 mètres sous le niveau du sol) et ayant une température de 26°C.

#### II-5-2 - Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales de cette population d'échantillons prélevés a été effectuée en y incluant les eaux de mine et celles des émergences minières de la ville de Saint-Etienne prélevées à une même époque du cycle hydrologique de l'année précédente..

Le résultat obtenu (tableau n°3-17) montre une corrélation très forte entre le T.A.C., le Na+ et l'extrait sec (coefficients de corrélation supérieurs à 0,84), qui évoluent en sens inverse des teneurs en Ca++ et Mg++.

L'axe n°1 représente 62% de l'information relative à la population étudiée; vers son pôle positif s'inscrivent les valeurs fortes de Na+, T.A.C et extrait sec; vers son pôle négatif les fortes teneurs en Ca++ et Mg++ (figure n°3-18).

L'axe n°2 représente 21% de l'information, il est essentiellement porteur des informations relatives aux sulfates (pôle négatif) et à la température (pôle positif) variant en sens inverse.

83% de l'information relative à la population sont ainsi fournis par ces deux seuls axes; ce résultat est important, il rend compte d'une distribution homogène de la population sur ces deux axes.

\*\*\*\*\*  
 \*\*  
 \*\* \*\*\*\*\* EDITION APRES ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES \*\*\*\*\*  
 \*\*  
 \*\*\*\*\*

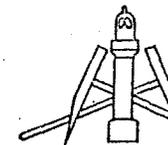
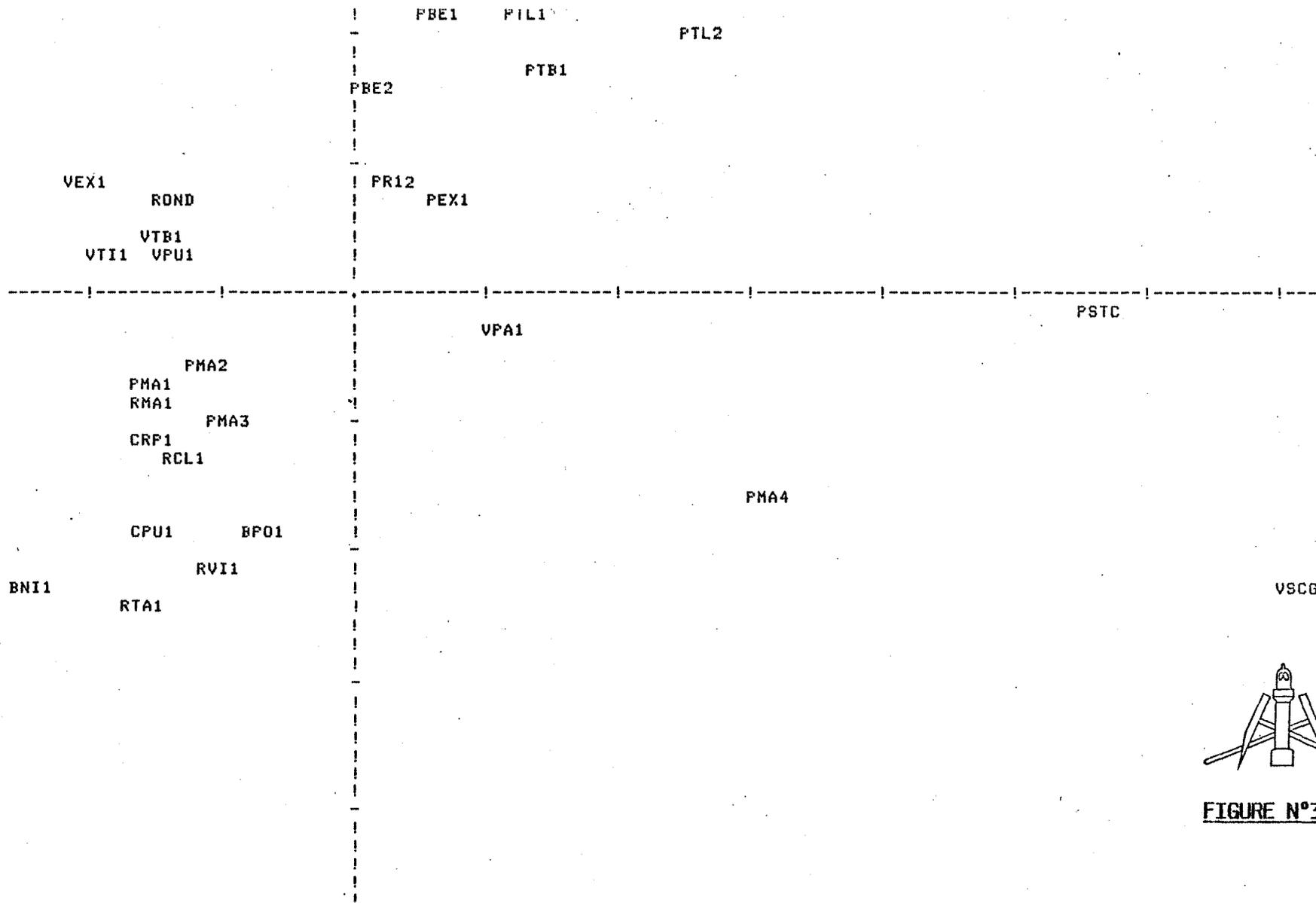


FIGURE N°3-17

RESULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

MATRICE DE CORRELATIONS

	TEMP	E.S.	PH	TAC	CA	MG	SO4	CL	NA
TEMP	1.0000								
E.S.	0.3545	1.0000							
PH	0.1818	0.7117	1.0000						
TAC	0.5499	0.8426	0.5815	1.0000					
CA	-0.7484	-0.4628	-0.5924	-0.6158	1.0000				
MG	-0.7141	-0.5067	-0.4810	-0.7366	0.8295	1.0000			
SO4	-0.2787	0.6027	0.3769	0.1544	0.1891	0.1773	1.0000		
CL	0.2513	0.7753	0.7461	0.7491	-0.5887	-0.5538	0.2877	1.0000	
NA	0.5179	0.9411	0.7399	0.9212	-0.6734	-0.7182	0.4114	0.8069	1.0000

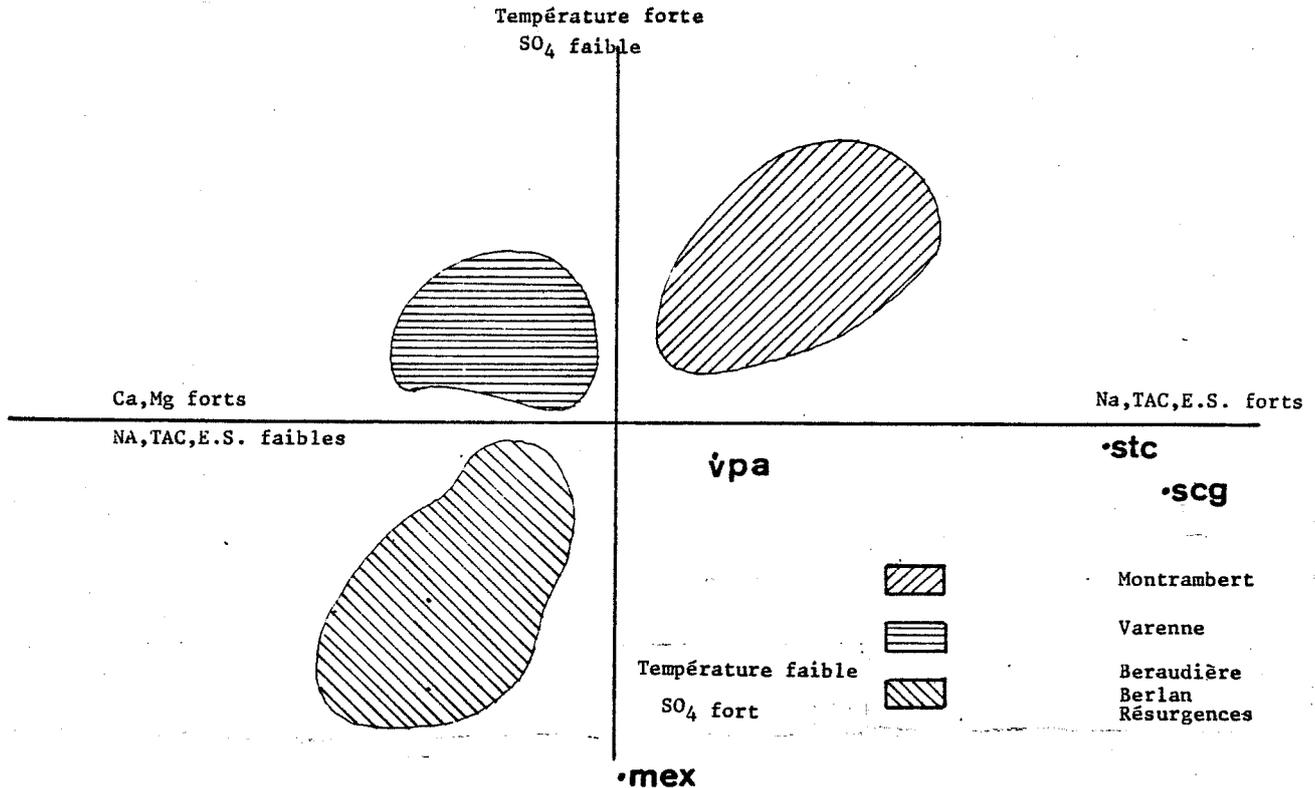
CONTRIBUTION DES FACTEURS A LA VARIANCE DES VARIABLES

	TEMP	E.S.	PH	TAC	CA	MG	SO4	CL	NA
	36.6068	77.4070	60.6126	83.0615	-63.5991	-65.3236	6.2280	71.2548	94.5049
	40.7778	-16.0048	-8.7798	0.0332	-21.7656	-21.0317	-77.8288	-5.0164	-2.5029
	-12.7029	-4.4951	19.7787	-3.3456	-4.3443	-0.0075	-6.2036	8.2750	-1.8233
	4.9672	-0.0730	5.1823	-10.1625	-5.7697	0.1065	7.1520	-6.2124	-0.0394
	3.3494	0.1622	-0.4297	-0.2057	-0.5525	10.0748	-0.1706	5.2704	-0.1695
	0.2567	0.3386	4.6347	2.3144	0.8138	2.7375	-2.1822	-3.3668	0.0092
	1.2738	0.0063	0.5571	-0.5114	3.1045	-0.6934	-0.0050	0.5793	-0.3497
	0.0638	-1.5130	0.0235	0.2214	0.0316	0.0213	0.1718	0.0245	0.1739
	-0.0016	0.0000	-0.0017	-0.1444	0.0188	0.0037	-0.0580	-0.0005	0.4272

EAUX DE MINE

FIGURE N°3-18

La population se répartit de la façon suivante:



Dans la division de Montrambert, les prélèvements sont effectués entre les cotes -320 et -220 NGF et dans celle de Varenne à la cote +100 NGF à l'exception d'une eau prélevée à la cote -136 NGF (VPA) dans un puisard dans lequel elle est stockée avant d'être pompée vers la surface.

Dans la division de la Beraudière, le niveau de l'eau est maintenu à la cote +356 NGF et les travaux de la fendue du Berlan sont compris entre la cote +425 NGF et la surface.

La profondeur apparaît donc comme un critère déterminant pour distinguer les eaux d'origine profonde qui montrent des fortes teneurs en Na<sup>+</sup>, T.A.C., E.S. et une forte température, des eaux d'origine peu profonde qui possèdent des teneurs plus élevées en Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> et SO<sub>4</sub><sup>--</sup> (J.PALYS 1978) et une température plus faible.

Les exceptions à cette règle sont l'eau du puisard aval de la Chana (VPA), les eaux de serrement (STC, SCG) et l'eau d'exhaure du puits du Marais à Roche-la-Molière (MEX) que nous étudierons plus loin.

L'analyse en composantes principales ne montre pas de variations sensibles du PH avec la profondeur.

## II-5-3 - Représentation diagrammatique

### II-5-3-1 : Diagramme de schoeller-Berkaloff

Le tracé des diagrammes de Schoeller-Berkaloff montre que les eaux d'une même concession présentent en général des faciès homogènes (les exceptions sont les mêmes que celles déterminées par l'analyse en composantes principales).

La figure n°3-19 résume les principaux types de faciès rencontrés et nous permet les constatations suivantes.

- la teneur en  $Mg^{++}$  (mé/l) est toujours supérieure à la teneur en  $Ca^{++}$  à l'inverse des eaux de surface.
- les eaux d'origine profonde, ou les eaux de serrement présentent une forte teneur en  $Na^+$ .
- dans ces eaux le T.A.C. est toujours supérieur au TH
- les eaux de faible profondeur ont des teneurs en  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $SO_4^{--}$  plus élevées que celles du fond
- l'eau d'exhaure du puits du Marais de Roche-la-Molière présente certaines caractéristiques d'eaux profondes (teneurs en  $Na^+$ ,  $HCO_3^-$ ) et certaines caractéristiques d'eaux peu profondes (teneurs en  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $SO_4^{--}$ )

### II-5-3-2 - Diagramme de Piper

Les eaux en provenance de la concession de Montrambert (concession la plus profonde), et les eaux de serrement se distinguent du reste de la population étudiée par leur nature nettement sodique et plutôt bicarbonaté (figure n°3-20).

Pour les autres échantillons ce diagramme est peu discriminant quant à la concession d'origine (figure n°3-21).

Trois échantillons se distinguent très nettement par leur faciès sulfaté, ce sont les eaux du puits du Marais de Roche-la-Molière, l'eau du puisard aval de la Chana et l'eau du niveau +425 de la fendue du Berlan.

L'acquisition d'un tel faciès est due au fait que ces eaux sont stockées dans la mine avant d'être pompées vers la surface de façon intermittente (les battements du niveau de l'eau permettent une oxydation de la pyrite dont les

Schématisation des diagrammes de

Schoeller-Berkaloff : les principaux faciès.

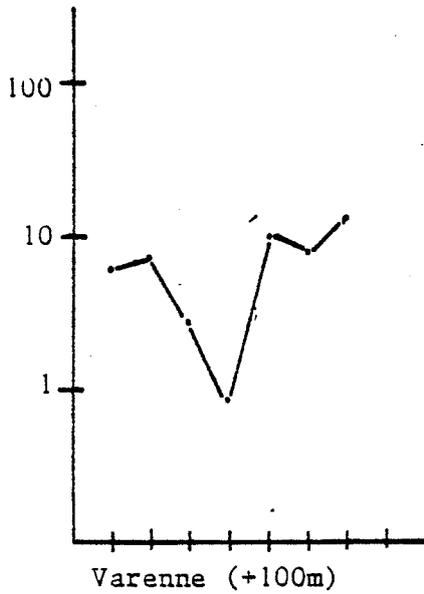
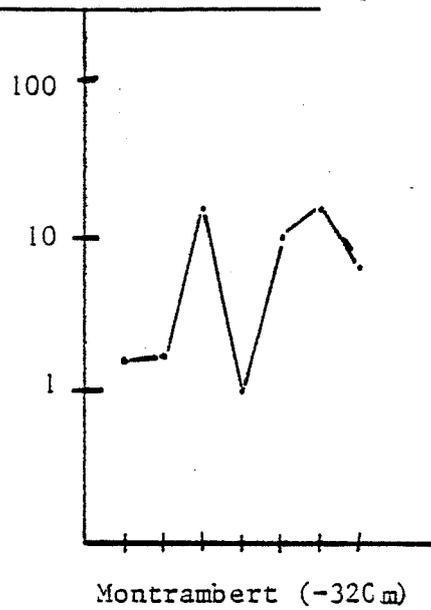
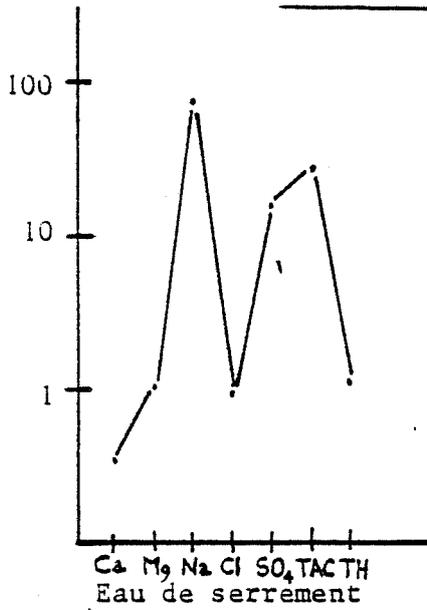


FIGURE N°3-19

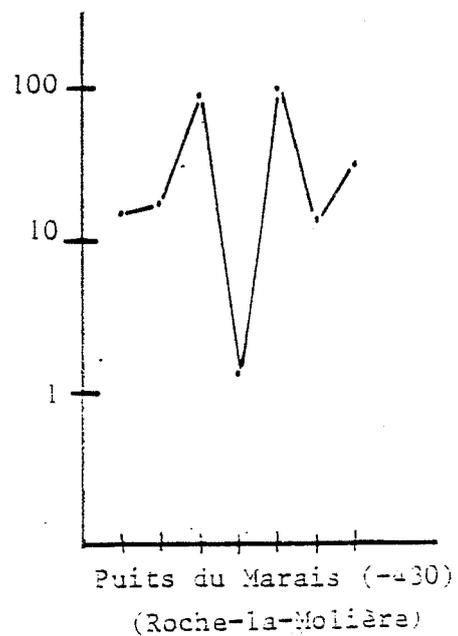
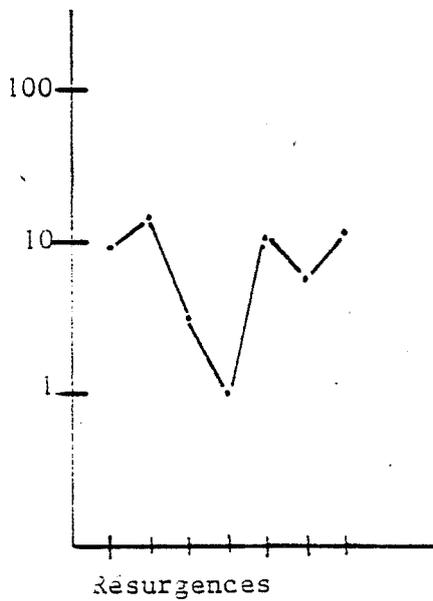
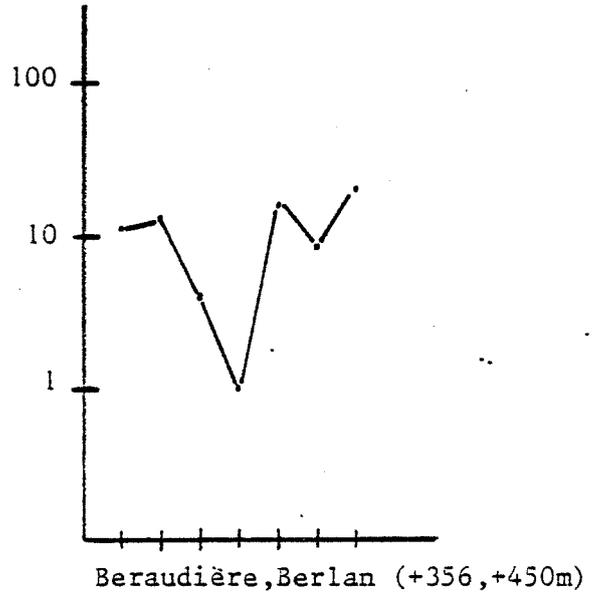


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

d'après PIPER (U.S. Geological Survey)

FIGURE N°3-20

- Montrambert
- ∇ Varenne
- Beraudière-Berlan
- \* Marais Roche-la-Molière

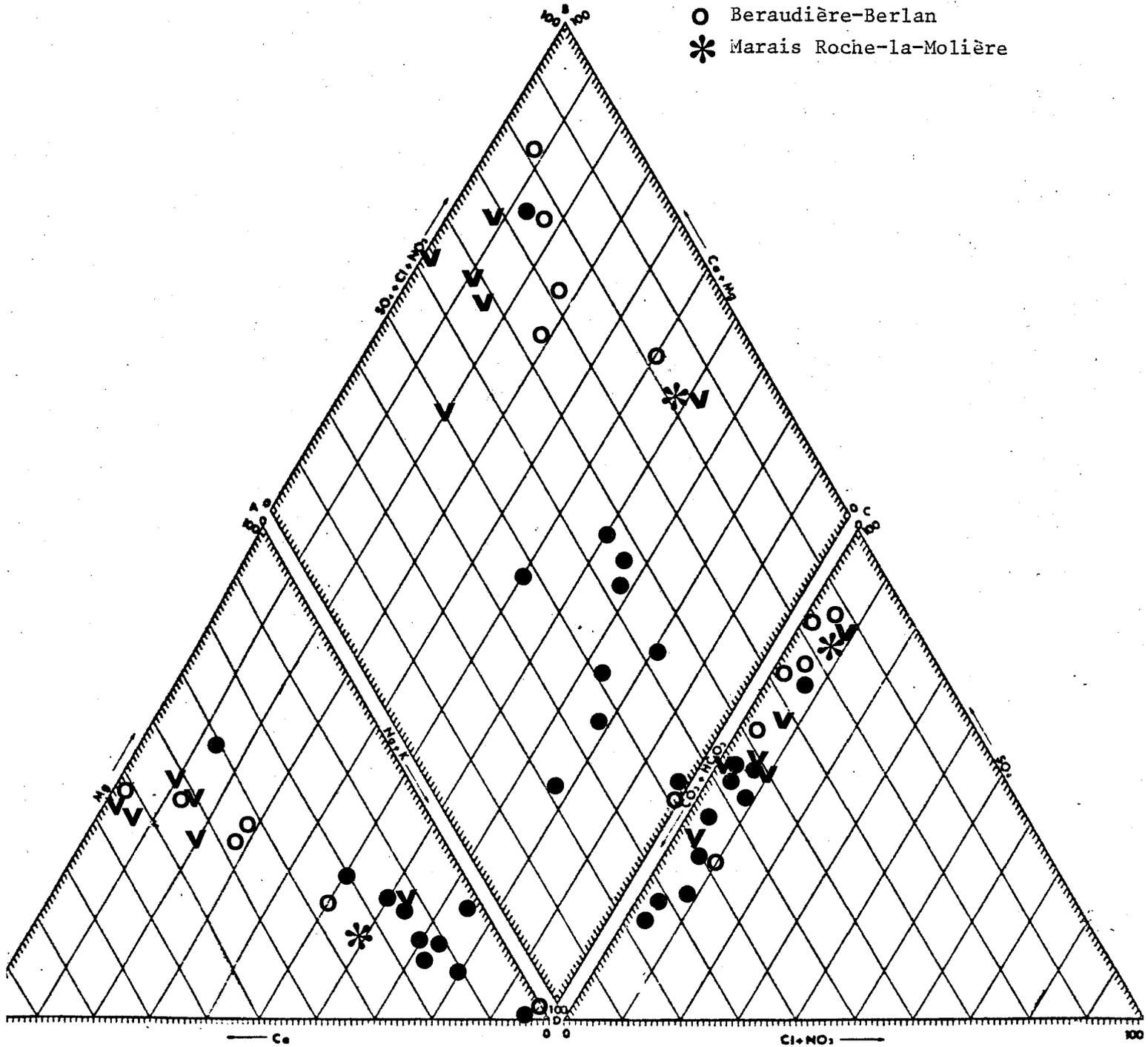
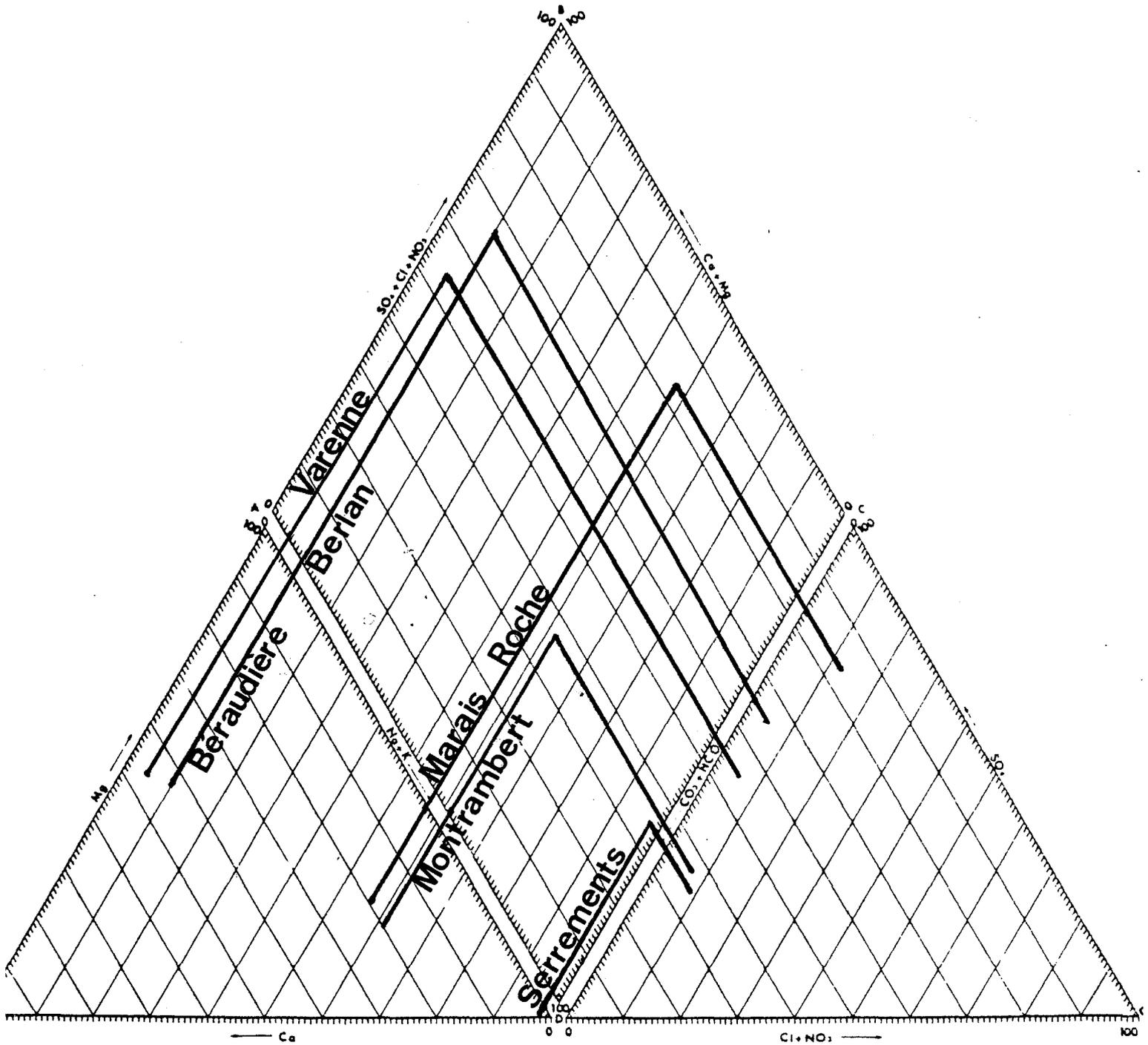


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

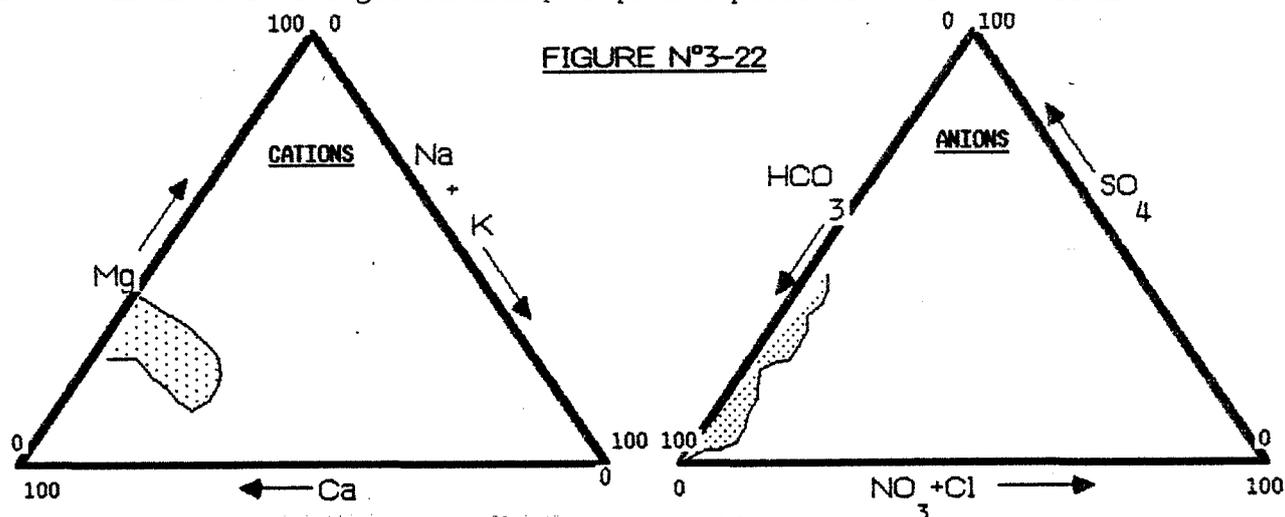
d'après PIPER (U.S. Geological Survey)

FIGURE N°3-21



produits d'oxydation sont ensuite dissous lors de la remontée du niveau d'eau).

Constatons que le diagramme obtenu est relativement proche de celui des eaux issues des mines de charbon des Rocheuses (Canada) (D.A. HACKBARTH, 1979), notamment au niveau des anions (figure n°3-22), avec cependant des teneurs en sodium plus élevées compensant un déficit de calcium, ce qui traduit l'existence d'échanges cationiques plus importants dans les terrains.



**CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES DES MINES DES ROCHEUSES**

**II-5-4 - Interprétation**

**II-5-4-1 - Cas général**

Au vu de l'analyse faite précédemment, il apparaît clairement que la qualité chimique d'une eau varie avec la distance et le temps de transit dans les terrains houillers.

Ainsi, si l'on retrace l'évolution chimique d'une eau provenant de la surface et circulant vers la profondeur, on peut la schématiser de la façon suivante :

\* Au début de son transit, c'est-à-dire pour un temps de séjour court, l'eau, peu minéralisée au départ, se charge en différents éléments issus des minéraux présents dans le terrain.

La minéralisation totale de l'eau évolue rapidement dans les premiers temps.

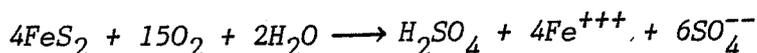
La présence de feldspaths plagioclases peut contribuer à l'acquisition de Calcium et de Sodium, la quantité de Calcium acquise est plus importante que la quantité de Sodium, ce qui peut être dû au fait que le pôle

calcique (anorthite) est plus altérable que le pôle sodique (albite).

Le Magnésium devrait être issu de la solubilisation de la Biotite (minéral très altérable) et de diverses argiles ferro-magnésiennes présents dans les schistes notamment.

Les quantités de SiO<sub>2</sub>, Al, K ...etc (non dosés) doivent aussi augmenter simultanément mais de façon moins importante par solubilisation de ces minéraux et de certains autres tels que les feldspaths potassiques, la muscovite, le quartz... etc moins altérables que les précédents.

Les sulfates et le fer, quant à eux, proviennent de la dissolution de la pyrite oxydée au contact de l'air :



Les terrains producteurs de sulfates sont d'abord les remblais superficiels, les terrils (terrains très aérés, ce qui facilite l'oxydation) (B.DEBAISIEUX, 1983 - D.A. HACKBARTH, 1979) et ensuite les terrains houillers exploités. La charge en sulfates peut donc être acquise dès les premiers mètres de transit.

\* Au fur et à mesure que l'eau circule plus profondément dans la mine, sa minéralisation d'ensemble augmente, essentiellement par accroissement de la teneur en sodium et du T.A.C. (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>--</sup>) alors que l'on constate une diminution des teneurs en Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup>.

L'augmentation de la teneur en sodium pourrait être liée à deux phénomènes :

-d'une part, la dissolution de la phase albitique qui se trouve facilitée par l'augmentation de la pression et de la température.

-d'autre part, des échanges de base qui peuvent se faire au détriment du calcium et du magnésium : rappelons que les argiles ont une structure moléculaire en feuillets entre lesquels s'intercalent des cations (Na<sup>+</sup> notamment) fixés par des liaisons faibles. Quand l'eau circule au contact de ces argiles, il se produit un échange entre l'ion calcium (et éventuellement magnésium) de l'eau, de plus faible diamètre, et l'ion sodium de l'argile. Des mécanismes semblables sont cités par S.R. MORANS (1978) concernant les mines du nord du Dakota (U.S.A.).

Ces deux phénomènes atteignent leur ampleur maximale dans les eaux de serremments pour lesquelles le temps de séjour dans la mine est très important en outre, ces eaux présentant un PH très élevé (8,5 et 9,7). Elles peuvent être le siège de précipitation de carbonates de calcium et de magnésium ce qui expliquerait leur très faible teneur en ces éléments.

L'augmentation du T.A.C. peut également être diversement expliquée :

- Soit le  $\text{CO}_3\text{H}$  est issu des quelques niveaux à sidérose ( $\text{Fe CO}_3$ ) présents dans le houiller (J. DE MAISTRE, 1963) mais la quantité n'en serait pas si importante.
- Soit il est issu de  $\text{CO}_2$  profond remontant dans les terrains au profit des principales failles (cette hypothèse reste peu probable dans un bassin sédimentaire; des mesures isotopiques seraient nécessaires pour la confirmer ou l'infirmier).
- Soit, et c'est l'hypothèse que nous retiendrons comme la plus probable, le  $\text{CO}_3\text{H}$  provient de la dissolution de  $\text{CO}_2$  relativement fréquent dans les terrains houillers issu de l'oxydation du charbon et des matières organiques qu'il contient (M.R. MORAN, 1979). La dissolution de ce gaz se fait d'autant plus facilement que la pression est élevée et donc que la profondeur est grande.

#### II-5-4-2 - Cas particuliers

Au travers des différentes approches faites précédemment nous avons distingué quelques échantillons présentant un faciès particulier. Nous allons tenter d'expliciter leur qualité.

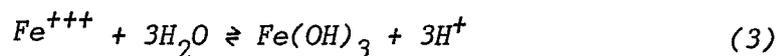
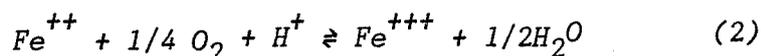
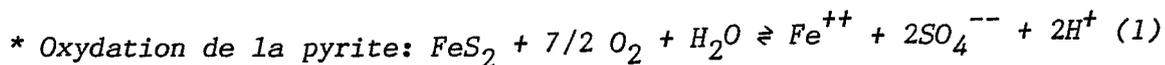
Pour les eaux de serrement, le temps de séjour très long dans les terrains houillers favorise les phénomènes d'échanges de base et de dissolution. Il en résulte une eau chargée en sodium et bicarbonates mais pauvre en calcium et magnésium. J. PALYS (1978) trouve des eaux de mêmes caractéristiques dans des mines profondes sans rapports avec la surface dans le bassin houiller de Haute-Silesie.

Les eaux du puisard aval de la Chana et du niveau +425 de la

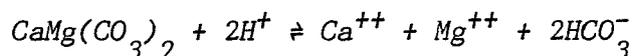
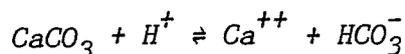
fendue du Berlan ont un rapport Na/Ca+Mg supérieur à 1 et une teneur en sulfates élevée. Cette composition chimique résulte d'une part du fait que ces eaux sont stockées dans des puisards avant d'être pompées vers la surface (leur temps de séjour dans la mine est long et leur faciès se rapproche donc de celui des eaux de serrement) d'autre part, du pompage alterné provoquant des battements du niveau d'eau favorisant l'oxydation de la pyrite quand le niveau est bas et que les terrains supérieurs sont dénoyés (D.HERVE - 1980).

L'eau du puits du Marais de Roche-la-Molière reste la plus particulière : elle présente en effet une forte température, une forte minéralisation, un T.A.C. élevé et une forte teneur en sodium la rapprochant d'une eau caractérisée par un long temps de séjour ou de transit dans la mine; cependant ses teneurs en calcium, magnésium et sulfates indiquent plutôt une origine superficielle. Cette contradiction apparente peut être due, d'une part au mode de pompage par pompes immergées, et d'autre part à la présence de nombreuses "découvertes" (en exploitation ou remblayées) sises dans la concession de Roche-la-Molière.

Le mode de pompage crée des battements artificiels de la nappe. Nous avons déjà signalé qu'ils favorisent l'acquisition de sulfates et de fer. D. HACKBARTH propose le mécanisme suivant dans ce type de situation (zone non saturée avec alternance de périodes sèches et noyées) :



\* l'ion ferrique apparait grace aux conditions très oxydantes et précipite en solution en hydroxyde ferrique (dépot rouge caractéristique des émergences minières). L'ion  $\text{H}^+$  libéré dans les réactions 1 et 3 augmente l'attaque des minéraux carbonatés suivant la réaction suivante :



D'autre part l'exhaure évacue des mélanges d'eaux d'origine profonde (chargées en  $\text{Na}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$  et dont la température est élevée)

accompagnées d'eaux d'origine plus superficielle (les fortes teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  proviennent des eaux superficielles ayant transité au travers des remblais ou des secteurs exploités en "découvertes" qui sont des zones très perméables et très aérées).

Un arrêt de l'exhaure au puits du Marais de Roche-la-Molière supprimera donc ces phénomènes de mélanges (R.C.FROST - 1978) et de battements artificiels de la nappe. La qualité chimique des eaux de résurgence dans la concession devrait donc être bien meilleure que celle des eaux d'exhaure car dotée d'une composante superficielle prépondérante.

#### II-5-5 - Conclusions

La qualité chimique d'une eau provenant de la surface et circulant vers la profondeur dans les terrains houillers des vallées de l'Ondaine et du Lizeron, évolue depuis un pôle chargé en Calcium, Magnésium, Sulfates, vers un pôle chargé en Sodium et en bicarbonates. parallèlement sa salinité globale croît. Il en est donc de même de sa densité.

Un gradient vertical de minéralisation devrait donc se mettre en place au sein d'une concession lors de son remplissage faisant suite à l'arrêt de l'exhaure (T.CAIRNEY, R.C.FROST, 1975).

Les résultats obtenus au cours de cette étude confirment ceux de l'étude effectuée en 1983 à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (A.CASTINEL, P.DAVOINE, R.DECHOMETS, S.RICHARD 1983) excepté au niveau de l'origine des sulfates que nous déterminons comme plutôt superficielle. Ce document apporte cependant des éléments nouveaux concernant les rapports entre les différents cations et l'importance du fer et du manganèse pour distinguer les eaux de mine et les eaux de surface.

#### II-6 - Conclusions générales concernant la qualité des eaux des vallées de l'Ondaine et du Lizeron

Les prélèvements effectués doivent être considérés comme des références pour les eaux de ruissellement superficiel (ils ont été effectués en période d'étiage sévère: dilution minimale).

Les résultats des analyses d'eaux réalisées montrent que

certains paramètres tels que le T.A.C., la température et la minéralisation permettent de distinguer chimiquement les "eaux de mine"\* des eaux de surface (figure n°3-23). Ces critères sont d'ailleurs souvent retenus par de nombreux auteurs.

La présence de fer et de manganèse ainsi qu'une teneur en magnésium supérieure à celle en calcium sont de même, généralement, significatifs d'une "eau de mine".

Par contre, les fortes teneurs en sulfates semblent caractériser les eaux circulant au travers de travaux miniers de faible profondeur, ou de remblais.

L'étude plus approfondie des eaux de mine permet de déterminer les caractéristiques des eaux profondes (T.A.C., E.S., Na<sup>+</sup>, température élevés) pour lesquelles la durée de transit a été importante, ainsi que celles des eaux moins profondes (Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>--</sup> élevés) à plus courte durée de transit. Elle montre que dans une concession minière en cours de remplissage, après l'arrêt de l'exhaure un gradient vertical de salinité se met en place (R.C. FROST, 1978). La qualité des eaux les plus superficielles qui sera celle des émergences éventuelles, tend vers la composition chimique d'un mélange où la composante eau de surface apparaît dominante. C'est d'ailleurs le cas des exutoires observés actuellement sur le site de la ville de Saint-Etienne.

\* au sens où ce terme est défini dans notre texte, c'est à dire : eaux d'infiltration ayant plus ou moins transité au sein des travaux miniers.

### III - Agressivité des eaux vis-à-vis-dés bétons

#### III-1 - Etude bibliographique

##### III-1-1 - Rappels:

De nos jours, le béton est l'élément de base de toute construction. L'importance et la diversité de son utilisation sont dues aux propriétés de ses différents constituants que l'on peut classer en quatre groupes:

Tout d'abord, on y trouve du ciment qui est lui-même un produit de synthèse aux caractéristiques très variables.

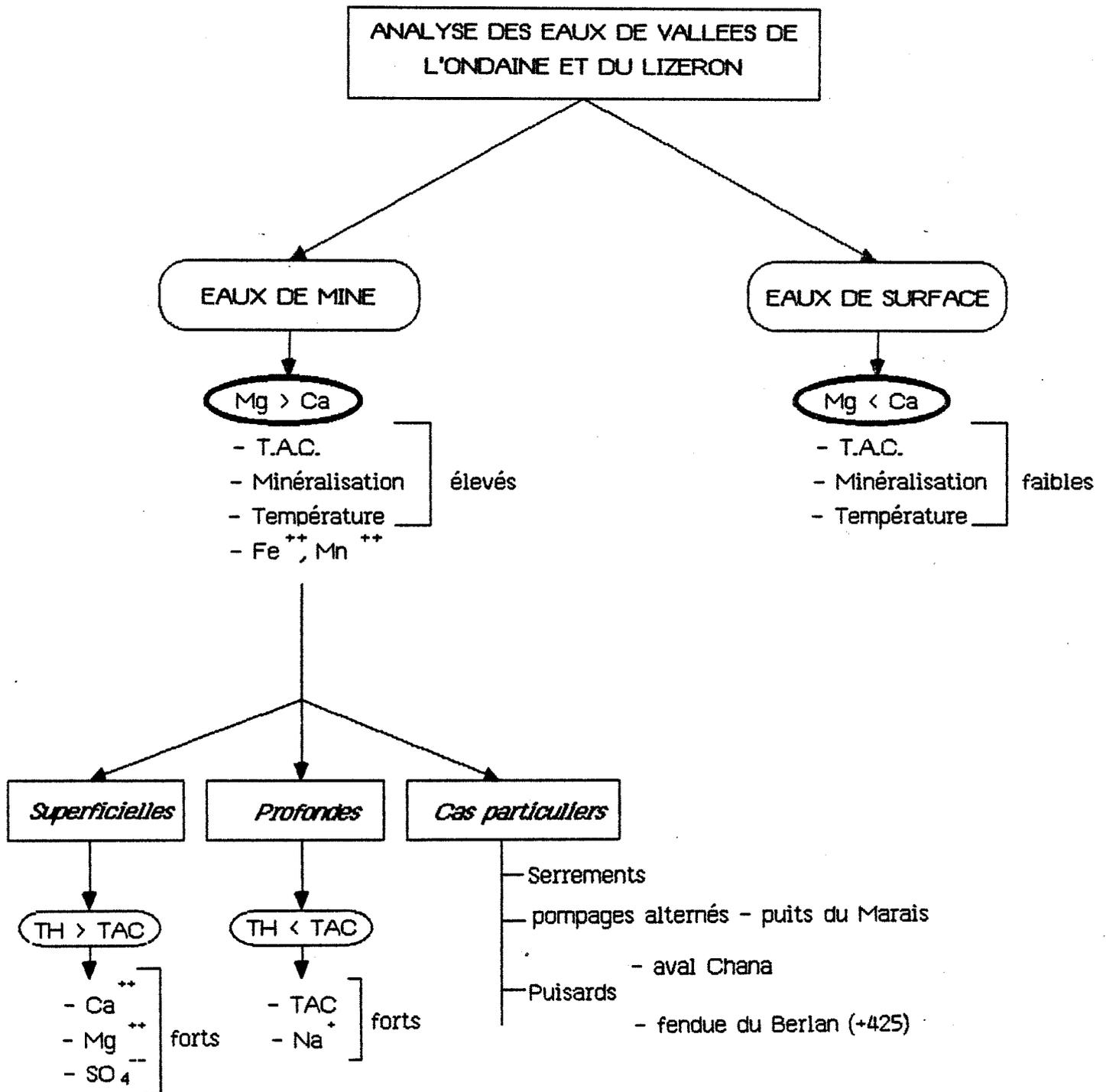


FIGURE N°3-23

Par ailleurs, on y ajoute des granulats: sable ou graviers.

L'eau permet la prise et le durcissement du béton.

Pour améliorer les qualités du béton, lors de sa mise en oeuvre ou ultérieurement après durcissement, on y ajoute des adjuvants.

### III-1-1-1- Le ciment

On obtient le ciment sous la forme d'une poudre fine en broyant et cuisant ensemble vers 1450°C du calcaire et de l'argile. La "pâte dure" est obtenue par hydratation des silicates et aluminates de chaux qui font prise et durcissent plus ou moins rapidement.

Les éléments constitutifs du ciment sont le clinker, le laitier et parfois des cendres ou pouzzolanes qui lui confèrent des propriétés caractéristiques.

On y ajoute d'autres éléments qui constituent le filler (adjuvants minéraux, silicatés et calciques).

#### \* Le clinker:

Le clinker est obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle du mélange de calcaire et d'argile. Il contient de la chaux, de la silice et de l'alumine.

Les principaux silicates et aluminates contenus dans le clinker sont:

- . le silicate tricalcique       $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$       noté  $\text{C}_3\text{S}$
- . le silicate bicalcique       $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$       noté  $\text{C}_2\text{S}$
- . l'aluminate tricalcique       $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$       noté  $\text{C}_3\text{A}$
- . l'aluminoferrite tetra calcique  $4\text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$  noté  $\text{C}_4\text{AF}$

Le clinker broyé avec un peu de gypse donne le ciment le plus ordinaire dit ciment PORTLAND. Le rôle du gypse est de réguler la prise du ciment.

\* Le laitier:

Le laitier est le résidu de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. sa composition dépend du minerai de fer utilisé et du type d'acier que l'on produit.

Le laitier contient entre 1 et 3% de soufre qu'il retient de l'acier. Par ailleurs, tout comme le clinker, il est composé de:

- . de la chaux entre 45 et 50%
- . de la silice entre 25 et 30%
- . de l'alumine entre 15 et 20%
- . de la magnésie environ 10%
- . ainsi que différents oxydes en proportion plus faible.

Dans les ciments le laitier est utilisé sous forme granulée.

L'intérêt des ciments au laitier, par rapport aux ciments PORTLAND ordinaires, est qu'ils résistent mieux aux sulfates.

Le seul composant du laitier ayant des propriétés de cémentation est le silicate bicalcique, noté  $C_2S$ , qui réagit lentement, s'hydrate moins vite que le PORTLAND mais qui est fortement hydraulique; c'est-à-dire qu'il absorbe beaucoup d'eau lors de la prise.

\* Les cendres:

Ce sont les résidus de la combustion de la houille et de la lignite réalisée dans les centrales thermiques. les ciments peuvent en contenir 5 à 20%.

\* Les pouzzolanes:

Ce sont des scories volcaniques qui contiennent de la silice, de l'alumine et de l'oxyde ferrique. Ces produits ont la propriété de fixer la chaux libre à température ambiante. De plus, ils forment des composés durcissant par hydratation.

Il existe d'autres produits qui ont des propriétés pouzzola-

niques. Ce sont par exemple les argiles cuites.

Ainsi, le ciment peut contenir plusieurs éléments de base différents mais qui comportent toujours de la silice, de l'alumine et de la chaux.

### III-1-1-2- Différents types de ciments

#### - Les ciments PORTLAND

Ce sont les ciments les plus ordinaires issus du mélange de clinker et de gypse.

On peut y ajouter du laitier mais sous cette dénomination la proportion de laitier est inférieure à 35% comme le montrent les exemples suivants:

- .CPA il contient 97% de clinker et 3% de filler
- .CPJ il contient 65% de clinker, du laitier avec ou non des pouzzolanes, des cendres et du filler
- .CPF (ciment PORTLAND de fer) il contient 65 à 75% de clinker et 25 à 35% de laitier.

#### - Les ciments au laitier

Les ciments de cette catégorie contiennent au moins deux fois plus de laitier que de clinker.

Exemples:

- .CHF (ciment de haut fourneau) il contient 60 à 75% de laitier et 25 à 30% de clinker.
- .CLK (ciment de laitier au clinker) il contient au moins 80% de laitier et au plus 20% de clinker.
- .CLX (ciment de laitier à la chaux) il contient au moins 70% de laitier et 30% de chaux.

- Les ciments sursulfatés

Les ciments dits sursulfatés sont particulièrement résistants à l'action agressive des sulfates puisque dès la prise le  $C_3A$  donne le l'Ettringite (ou sel de CANDLOT: aluminat de calcium dont la formule est  $3CaO, 3CaSO_4, Al_2O_3, 30H_2O$ ). Ils contiennent au moins 75% de laitier, du gypse et au plus 5% de chaux.

Les rapports de chaux sur silice et alumine sur silice y sont bien définis.

Le laitier doit être d'une constitution telle que:

$$1.45 < \frac{CaO}{SiO_2} < 1.54 \quad \text{et} \quad 1.8 < \frac{SiO_2}{Al_2O_3} < 1.9$$

Il se forme aussi de la Tobermorite qui est un silicate de calcium hydraté, de formule  $Si_2O_7 Ca_3, 3H_2O$ .

La résistance particulière aux sulfates de ces ciments est due à l'absence de chaux qui ne peut donc pas se recombinaer sous forme de gypse  $Ca SO_4$  en présence de sulfates. Par ailleurs, l'alumine  $Al_2O_3$  du ciment, déjà combiné sous forme d'Ettringite ne peut donc plus, réagir avec le gypse.

- Les ciments alumineux ou ciments fondus

Ces ciments sont formés d'un mélange de bauxite et de calcaire. Ils sont bien résistants aux sulfates grâce à l'action protectrice de gels d'alumine et de gels contenant du fer.

Le principal constituant de ce ciment est l'aluminat monocalcique CA qui est à l'origine de ses propriétés.

Il contient:

- . de l'alumine  $Al_2O_3$  entre 40 et 50%
- . de la chaux  $CaO$  entre 35 et 40%
- . de l'oxyde ferrique  $Fe_2O_3$  moins de 15%
- . de la silice  $SiO_2$  entre 4 et 10%
- . de l'oxyde ferreux  $FeO$  moins de 6%
- . de l'oxyde de titane  $TiO_2$  moins de 3%
- . de la magnésie  $MgO$  moins de 2%

On choisit donc le ciment selon son utilisation. On le mélange

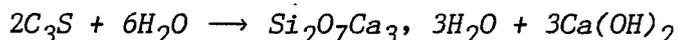
aux granulats et à l'eau. Il y a alors hydratation du ciment.

### III-1-1-3- Mécanisme d'hydratation des ciments

En présence d'eau le ciment réagit pour former une pâte visqueuse qui durcit plus ou moins vite.

Les sels minéraux amorphes, anhydres et instables s'hydratent et cristallisent en de nouveaux constituants stables. la formation de cristaux (en aiguilles) constitue la prise.

Par exemple, le silicate de calcium hydraté, nommé Tobermorite, se forme suivant la réaction ci-dessous:



Cette réaction s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

L'importance volumique de l'eau dans le béton est assez grande. En effet, l'eau de cristallisation représente 25 à 30% du poids du mélange (TAYLOR-1964).

Les composants des ciments ne réagissent pas tous de la même façon. Dans le ciment PORTLAND, le principal constituant  $C_3S$  prend en quelques heures et durcit en quelques semaines. Il est fortement hydraulique. Par contre le  $\beta C_2S$  réagit plus lentement, sa prise s'effectue en quelques jours et son durcissement nécessite plusieurs mois tout en demeurant fortement hydraulique. Son polymorphe le  $\gamma C_2S$  quant à lui, reste inerte. Enfin le  $C_3S$  possède, et de loin, la prise la plus rapide: quelques minutes. On la ralentit par l'adjonction de gypse. Lui aussi est très hydraulique.

Les ciments au laitier s'hydratent moins vite que les PORTLAND.

En ce qui concerne les ciments aluminaires leur durcissement s'effectue inversement plus rapidement que celui des PORTLAND, leur principal constituant qui est l'aluminate monocalcique, réagit en effet assez vite.

### III-1-1-4- Caractéristiques du béton (G. DREUX-1979).

Le béton est défini par sa composition chimique et ses qualités physiques.

Du point de vue chimique, ses éléments constitutifs après broyage et cuisson sont:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  et  $C_4AF$ .

Pour mieux connaître les proportions de ces diverses phases, on définit l'indice d'hydraulicité ou indice de VICAT comme étant le rapport de la fraction acide à la fraction basique.

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

- Si  $I < 0.5$  le ciment est dit basique. c'est le cas en particulier des ciments PORTLAND.
- Si  $I > 0.5$  le ciment est dit neutre ou encore riche en laitier.
- Si  $I \neq 1$  le ciment est dit acide. C'est-à-dire qu'il fait prise en libérant l'alumine.

Plus  $I$  sera grand, plus le ciment sera résistant.

D'autre part on préconise certaines valeurs limites aux rapports:

$$1.40 < \frac{CaO}{SiO_2} < 1.45 \quad 0.45 < \frac{Al_2O_3}{SiO_2} < 0.50$$

Du point de vue physique, deux facteurs primordiaux permettent de caractériser le béton. Ce sont sa résistance mécanique à la compression et sa compacité.

Chaque type de ciment est défini par sa résistance mécanique à la compression au bout de 28 jours. Quant à la compacité, elle correspond à:

$$C = 1 - \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}}$$

Il faut particulièrement insister sur l'importance prépondérante d'une forte compacité dans un béton car sa résistance à l'attaque chimique des eaux en dépend.

L'expérience montre qu'il vaut mieux s'attacher à maintenir ce paramètre dans un domaine de valeur favorable plutôt qu'à limiter la formation tardive de sels expansifs néfastes au béton.

### III-1-2 - Durabilité des bétons

Depuis les années 30, la connaissance a peu évolué dans les domaines du gonflement, de l'expansion, de la corrosion des armatures métalliques, de la réaction alcali-agrégat, de la transformation cristallo-graphique du ciment alumineux et de l'hydrolyse alcaline qui sont tous des phénomènes affectant le bon comportement d'un béton. Comment le béton est-il agressé chimiquement et quels types d'attaque subit-il ?

#### III-1-2-1 - Facteurs modifiant la durabilité

La durabilité est la résistance du ciment aux agressions chimiques. Elle est affectée par la teneur en sulfates et en carbonates des granulats. La bibliographie, très abondante, donne des avis très divers sur l'influence relative des facteurs provoquant l'attaque chimique du béton. Mais on peut dire cependant que les facteurs les plus importants sont:

- ceux qui ont pour effet une perte de poids ou de résistance provenant d'un lessivage des composés solubles du béton.
- ceux qui forment des composés non hydrauliques avec réduction de la structure résistante.
- ceux qui provoquent une expansion fissurante par cristallisation.
- ceux qui induisent une corrosion électrochimique des armatures métalliques.

#### Remarque:

A la lecture de cette énumération on comprend l'importance d'une bonne compacité du béton.

#### III-1-2-2 - Types d'attaques chimiques du béton

Il existe deux sortes de dégradation qui sont le lessivage et la formation de composés expansifs.

- le lessivage entraîne une perte de poids par dissolution des composés solubles dans l'eau. Les eaux en cause sont soit acides soit douces. On observe un évidement et un affaissement de la structure provoqué par cette dissolution.

Par exemple, l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  est le plus soluble des hydrates des pâtes à ciment. Sa dissolution se produit en surface ou par percolation.

- la formation de composés expansifs.

En solution dans l'eau, le sulfate de calcium peut réagir en provoquant la formation de composés expansifs, tels l'Ettringite et la Thaumasite, qui en gonflant entraînent des fissurations dans le béton.

De même, le sulfate de magnésium présent surtout dans l'eau de mer peut provoquer l'expansion de certains composés solides par un mécanisme ionique.

La fissuration néogène s'accompagne de modifications des caractéristiques mécaniques (perte de compacité et de résistance), et accroît les possibilités de dissolution.

### III-1-3 - Eaux agressives vis-à-vis du béton (J.CALLEJA, J.ROBERT-1980)

Une eau, qu'elle soit pure, acide, basique ou dominante saline, peut toujours agir chimiquement sur un béton en provoquant l'un des deux phénomènes cités précédemment. Nous allons examiner maintenant plus en détail ces différentes eaux et leur action.

#### III-1-3-1 - Les eaux pures

Elles ne contiennent pas de bicarbonate de calcium. On les rencontre à la surface des régions dont le sous-sol est constitué de roches cristallines, éruptives ou métamorphiques.

La réaction d'équilibre des carbonates dans l'eau est la suivante:



(Le carbonate est insoluble contrairement au bicarbonate).

Dans ces eaux la chaux vive du béton se dissout (Kleinlogel) et

le gaz carbonique dissout attaque les silicates et les aluminates.

On considérera comme dangereuse une eau dont le titre hydrotimétrique exprimé en degrés français est inférieur à 4°.

$$(TH = \sum (CO_3H)_2 X, SO_4 X, Cl X \quad \text{avec } X = Mg, Ca)$$

### III-1-3-2 - Les eaux acides

Ces eaux contiennent de l'acide carbonique en excès. L'équilibre précédent n'est donc pas réalisé. Cet excès transforme  $CaCO_3$  en bicarbonate de calcium soluble.

Si pH est inférieur ou égal à 4.5, les bétons sont fortement attaqués quel que soit le ciment utilisé surtout s'il s'agit de ciment PORTLAND.

Par contre, les ciments alumineux peuvent résister sans protection spéciale aux eaux dont les pH sont compris entre 4 et 6.

### III-1-3-3 - Les eaux basiques

Ces eaux hydrolysent l'aluminate de chaux des ciments fondus. les carbonates alcalins, de calcium ou de magnésium agissent sur le ciment en le carbonatant.

Il apparaît des cristaux dont la croissance peut endommager le béton. contrairement aux eaux acides, les eaux basiques n'affectent pas les ciments PORTLAND. Ceux-ci résistent bien dès que le pH est supérieur à 6.

### III-1-3-4 - Les eaux salines

L'attaque saline la plus fréquente est celle due aux chlorures et aux sulfates. Nous allons étudier plus en détail, ultérieurement, l'attaque par les sulfates.

Il existe d'autres types d'attaques salines qui dépendent de la composition chimique du béton. Mais généralement, ces réactions produisent des corps solubles qui ne sont pas nocifs, sauf dans le cas de l'attaque par les nitrates. Il faudra alors utiliser un ciment au laitier contenant plus de 70% de laitier plutôt qu'un ciment PORTLAND ordinaire.

\* Les eaux séléniteuses:

Par définition, ce sont des eaux qui contiennent du sulfate de calcium (au sens large, on désigne ainsi toutes les eaux sulfatées).

Le sulfate dissout réagit avec l'aluminate tricalcique  $C_3A$  pour former l'Ettringite  $Al_2O_3, 3CaO, 3CaSO_4, 30H_2O$ .

Il faut donc limiter la teneur en  $C_3A$  des ciments PORTLAND pour qu'ils résistent mieux aux eaux séléniteuses.

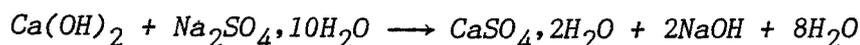
Selon le type de cation associé aux anions sulfates ( $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ), l'agressivité de la solution varie de manière inversement proportionnelle à sa concentration en calcium. Les eaux sulfatées sodiques, potassiques ou magnésiennes sont donc plus agressives que les eaux calciques).

D'autre part, l'expansion de l'Ettringite fluctue elle aussi. Si le sulfate réagit directement sur le  $C_3A$  cristallin, sa propension à l'expansion est grande. Par contre, s'il s'associe seulement à l'alumine en solution dans les pores, elle est nettement plus faible.

Le problème est donc fort complexe et il faut se garder de toute conclusion hâtive qui ne tiendrait pas compte de l'ensemble des paramètres chimiques concernant d'une part le béton mis en jeu et d'autre part les eaux qui peuvent être à son contact, ainsi que des caractéristiques physiques du béton (compacité) et des sels formés (configuration des cristaux).

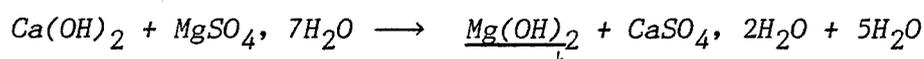
Le mécanisme de l'attaque se déroule donc en deux temps:  
(M.REGOURD, K.OGAWA, R.MIKHAIL-1981- P.K.MEHTA-1982)

-Transformation de la chaux libre du béton en sulfate de calcium:

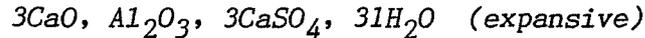
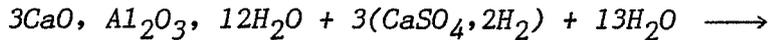


$CaSO_4$  est soluble jusqu'à une concentration de 1.2 g/l, le reste se précipite sous forme de gypse secondaire  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  expansif.

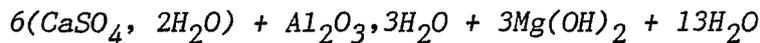
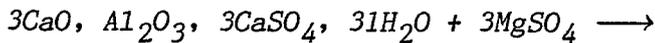
Dans l'eau de mer, il se produit:



-Formation de sel de CANDLOT:



Dans le cas de solutions magnésiennes, l'Ettringite est décomposée en gypse, magnésie et alumine:

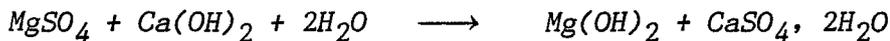


De plus cette attaque s'accompagne d'autres réactions.

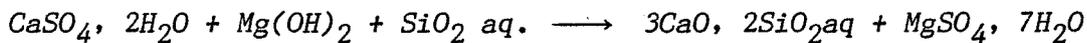
Formation de cristaux de sulfates alcalins:

Qui entraîne une fissuration et un éclatement du béton.

Formation de brucite:



Formation de silice hydratée: (si le sulfate est magnésien)



On voit ainsi que de nombreuses réactions se superposent voire s'opposent suivant des mécanismes complexes.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que notre rapport, soucieux de rester clair, n'a pas voulu entrer dans les détails des controverses des chercheurs. En effet, selon les méthodes d'étude de chacun, ceux-ci obtiennent parfois des résultats contradictoires sur certains points tels: l'influence du pH sur l'expansion, l'action de la pression osmotique, le rôle de la granulométrie, celui de la durée de contact et de la concentration en chlorures... Il faudrait pouvoir coordonner les axes de recherche et les conditions d'expérimentation pour trancher.

A noter cependant, que notre analyse bibliographique permet de considérer le sulfate de magnésium comme le sel le plus agressif. Il provoque en effet l'apparition d'un front d'Ettringite qui progresse dans le béton en le fissurant, suivi de l'implantation de cristaux de gypse ou de brucite qui exacerbent ainsi l'expansion.

III-1-4 - Normes et limitations d'emploi des ciments en milieu séléniteux

\* Normes

La circulaire n° 44 du 18 juillet 1967 limite l'utilisation des liants hydrauliques dans les eaux à forte teneur en sulfates.

- Ciment PORTLAND sans constituant secondaire : (CPA, HRI, super).

- La concentration en oxyde de magnésium MgO est limitée à 4 %.
- La concentration en  $SO_3$  doit être inférieure à 2,3 %.
- La perte au feu inférieure ou égale à 3 %.
- La teneur en insoluble inférieure à 0,75 %.

$$(C_3A) \leq 5 \%$$

$$2(C_3A) + (C_4AF) \leq 20 \%$$

- Ciment PORTLAND avec constituant secondaire (CPAL, CPAC, CP ALC, CPAZ, CPF).

Ces ciments sont admis, si leur clinker satisfait aux conditions précédentes.

- Ciment au laitier, ciment sursulfaté

Ces ciments ayant un bon comportement dans les eaux sulfatées, aucune limitation n'a été définie.

\* Mesures préventives

Dans les solutions sulfatées,  $C_3A$  est un composé vulnérable. Pour éviter la formation d'Ettringite, on a donc intérêt à utiliser, à titre préventif, des ciments PORTLAND pauvres en  $C_3A$ . Certains auteurs conseillent  $(C_3A) \leq 6,5 \%$ . La norme française exige :  $C_3A \leq 5 \%$  et  $2 C_3A + C_4AF \leq 20\%$

Pour les soviétiques et les espagnoles :  $C_3A \leq 5 \%$  et  $C_3A + C_4AF \leq 22 \%$ .

Toutes ces valeurs paraissent, en fait, quelque peu arbitraires. Certains tiennent compte du mouvement de l'eau. Ils définissent des limites de concentration en sulfate suivant que l'eau se renouvelle ou non :

- Agressivité des sulfates dans les eaux se renouvelant

La limite ( $SO_4^{--}$ ) admissible conseillée atteint : 400 mg/1, pour un PORTLAND ordinaire. Si la concentration en chlorures est supérieure à 1g/1, cette concentration limite en sulfate passe à 800 mg/1.

Au-delà et jusqu'à 3000 mg/1, on prescrit un ciment tel que ( $C_3A$ ) < 5 %.

Au-dessus, il faut un ciment sans  $C_3A$ .

- Agressivité des sulfates dans les eaux se renouvelant peu :

Si ( $SO_4^{--}$ ) < 1 g/1, on peut accepter des CPA ordinaires.

Si 1 g/1 < ( $SO_4^{--}$ ) < 4 g/1, il est nécessaire d'utiliser un ciment résistant aux eaux séliniteuses.

Si 4 g/1 < ( $SO_4^{--}$ ) < 5g/1, il faut un CPA sans  $C_3A$ .

Là encore, ces diverses spécifications apparaissent bien arbitraires.

Notre revue bibliographique nous a permis, cependant, de trouver d'autres recommandations, mieux fondées. C'est le cas, en particulier des "bornes" proposées par le CEMBUREAU à la suite d'une analyse mondiale exhaustive des divers incidents relatés par écrit.

Voici quelques extraits concernant les paramètres qui nous intéressent :

TABLEAU N°3-24

Degré d'attaque Eau	Attaque faible	Attaque modérée	Attaque forte	Attaque très forte
PH	6,5/5,5	5,5/4,5	4,5/4,0	4,0
$SO_4^{--}$ (mg/1)	200/600	600/3000	3000/6000	6000
$Mg^{++}$ (mg/1)	100/300	300/1500	1500/3000	3000
CO2 en excès (mg/1)	15/30	30/60	60/100	100

Finalement on peut dire que l'attaque est certaine et les conséquences importantes dans le cas où une au moins des conditions suivantes est vérifiée :

$$\text{pH} \leq 4,5 \quad \text{CO}_2 \text{ en excès} \geq 60 \text{ mg/l} \quad \text{SO}_4^{=} \geq 3000 \text{ mg/l}$$

Remarquons que, des phases aluminates ne sont pas les seules concernées. Il faut tenir compte aussi des phases ferritiques. Le problème consiste donc à pouvoir définir, à priori, les proportions relatives de ces différents constituants. En effet, selon les procédés de fabrication, on n'obtiendra pas les mêmes compositions de  $\text{C}_3\text{A}$  en phases vitreuses et des autres aluminates en solutions solides ferritiques  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Ainsi, les spécifications fondées sur la composition potentielle sont-elles peu significatives car à partir de compositions initiales identiques, on peut aboutir à des produits dotés de comportements différents.

En conclusion, on voit que l'action agressive d'une eau, de composition complexe, sur un béton n'est jamais simple. Il s'agit le plus souvent de l'intervention conjuguée, à la fois, de plusieurs sels en solution et de plusieurs facteurs. Et, il est bien difficile à la lecture des résultats d'une analyse d'eau de préciser si l'attaque sera faible, moyenne ou forte.

Pour déterminer l'intensité de cette attaque, il semble donc préférable de s'orienter vers la pratique d'essais si possible in situ.

Le tableau suivant (n°3-25) retrace rapidement la qualité des principaux faciès pour les eaux de la région stéphanoise :

L'examen de ce tableau permet de classer les eaux étudiées dans la catégorie des eaux faiblement à modérément agressives. En particulier, si on admet que les eaux souterraines de la région stéphanoise, susceptibles d'être en contact avec des fondations, possèdent des compositions chimiques proches de celles des émergences ou des piézomètres ; on peut tenter d'apprécier leur pouvoir agressif, en se référant aux recommandations du CEMBUREAU rappelées précédemment. On constate, en effet, qu'en "terme" de PH et de  $\text{SO}_4^{=}$  elles appartiennent respectivement aux classes suivantes : "attaque faible" et "attaque modérée".

Origine Analyse	SURFACE	MINE PEU PROFONDE EMERGENCES	MINE PROFONDE SERREMENTS
TEMPERATURE	11°C	15 - 20°C	> 20°C
E. S. (mg/l)	4,5	6,9	8,3
TH / TAC (mé/l)	TH > TAC	TH <> TAC (fonction de la pluviométrie)	TH < TAC
Mg (mg/l)	10 - 30	100 - 150	50 - 100
Ca / Mg (mé/l)	Ca > Mg	Mg <> Ca (fonction de la pluviométrie)	Mg > Ca
SO <sub>4</sub> (mg/l)	< 350	1000	800
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	< 200	500 - 1350	1000 - 1900
CO <sub>2</sub> (mg/l)		5 - 70	5 - 50
$\frac{rNa}{rCa + rMg}$		< 1	> 1

TABLEAU N°3-25

QUALITE DES EAUX DE LA REGION STEPHANOISE

III-1-5 - Qualité des bétons des fondations de la région stéphanoise

Il semble que le ciment habituellement utilisé, jusqu'en 1960, par les constructeurs, dans l'ensemble de la région stéphanoise, était un ciment au laitier (CLK 250\*) provenant des hauts fourneaux de CHASSE SUR RHONE. Ceci résulte de la proximité du site de fabrication, jointe à un prix plus avantageux, à l'époque, que celui du ciment ordinaire. Ce ciment, on le sait, résiste fort bien aux eaux sulfatées et/ou acides.

Par contre, après la fermeture des hauts fourneaux les entreprises s'alimentèrent souvent en ciment ordinaire de type PORTLAND, devenu moins cher, ciment peu résistant aux eaux agressives. Il est probable que la plupart des fondations superficielles (moins de 5 m en dessous du dernier étage) réalisées après 1960 l'ont été à l'aide du ciment PORTLAND lorsque leur environnement ne semblait pas poser de problème lors de l'exécution des travaux (absence d'eau par exemple).

Quant aux fondations profondes de cette même époque, si l'on s'en réfère aux réponses fournies, par les entreprises Claude ROCHER (SAINT-ETIENNE) et Etudes et Travaux de Fondations (LYON), à une enquête menée par la Direction Départementale de l'Equipement, elles furent réalisées à l'aide de ciments CLK (CLK 45 et CLK 325) lorsque l'on a rencontré de l'eau.

Il est à noter que les bureaux de contrôle (SOCOTEC et VERITAS), contactés parallèlement, n'ont pas accepté de répondre sur ce point.

Remarquons, enfin, qu'en cas de remontée du niveau des eaux au premier problème de l'attaque chimique vient s'adjoindre un autre problème tout aussi important celui du lessivage des terrains environnant les fondations (pieux par exemple) éliminant ainsi totalement ou partiellement la contrainte radiale des terrains.

Il semble, là encore, que pour les fondations profondes cette éventualité ait été prise en compte en les surdimensionnant. Mais qu'en est-il exactement des fondations superficielles ?

---

\* résistance mécanique à la compression à 28 jours en bars.

III-1-6 - Les principaux essais permettant d'apprécier l'altérabilité des bétons

Si la plupart des auteurs commencent aujourd'hui à s'accorder sur l'action d'un ions particulier vis-à-vis d'un béton donné, leurs avis divergent quant à l'action conjuguée de plusieurs ions.

Dans le cas des eaux sulfatées à chimisme complexe, l'appréciation de leur action ne peut être réalisée qu'au moyen d'essais dont le principe est beaucoup plus de mesurer l'allongement d'une éprouvette de béton dû à l'expansion de l'Ettringite (ou sel de CANDLOT) que la diminution de sa résistance mécanique.

Quatre essais ont pu être recensés.

\* L'essai MIN (M.J. JASPERS - 1977)

Cet essai consiste à fabriquer une solution artificielle et à examiner son action sur divers bétons. Il est utilisé par les cimentiers pour tester de nouveaux produits, mais il n'est pas adapté à la détermination de l'agressivité des eaux.

\* La méthode de la section des liants hydrauliques

Cette méthode consiste en l'exposition alternée d'une éprouvette de béton à des prélèvements d'eau puis à l'air. Elle est particulièrement indiquée pour les constructions sises en bord de mer, soumises à l'influence des marées.

\* L'essai LE CHATELIER-ANSTETT (M.J. JASPERS - 1968)

Cet essai vise plus particulièrement à apprécier l'attaque des bétons par les eaux sulfatées. Il consiste en la fabrication d'éprouvettes dites de "pate pure", constituées par un mélange de ciment, de gypse et d'eau. Ces éprouvettes sont ensuite comprimées et maintenues en atmosphère humide. Le seuil de résistance est fixé à 1,8 % d'allongement du diamètre au bout de 28 jours.

Cet essai a l'avantage de provoquer des allongements mesurables au pied à coulisse, mais il est encore une fois inadapté pour évaluer l'agressivité de l'eau.

\* La méthode utilisée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées : méthode A.S.T.M. modifiée (M.J. JASPERS - 1970)

Cette méthode, consiste à plonger des éprouvettes de mortiers (ciment + sable + eau) dans l'eau dont on veut évaluer l'agressivité, puis à mesurer leur allongement au cours du temps.

L'essai classique se fait sur des éprouvette 4 x 4 x 16 (cm), le Laboratoire central des ponts et chaussées, pour accélérer les effets réalise cet essai sur des éprouvette 2 x 2 x 16 (cm), ce qui permet de tirer les conclusions dans un délai de 6 mois à 1 an.

L'allongement sera, naturellement, plus faible que dans le cas précédent. (Quelques centaines de  $\mu$ /mètres au bout de 6 mois).

Le seuil de résistance est empiriquement fixé habituellement à 800  $\mu$ /m, au bout de six mois.

C'est la méthode qui a été mise en oeuvre pour mesurer l'agressivité des eaux de résurgences existant actuellement dans la région stéphanoise.

### III-1-7 - Conclusions

La réflexion que nous avons menée sur le thème de l'agressivité des eaux souterraines de la région stéphanoise vis-à-vis des bétons permet d'aboutir aux principales conclusions suivantes :

1) L'action agressive d'une eau sur un béton n'est jamais simple. Il s'agit le plus souvent, de l'intervention conjuguée à la fois de plusieurs sels en solution et de plusieurs facteurs.

2) Il est bien difficile à la lecture des résultats d'une analyse d'eau de préciser si l'attaque sera faible, moyenne ou forte.

3) Pour déterminer l'intensité de cette attaque, il semble préférable de s'orienter vers la pratique d'essais in situ (méthode ASTM). De tels essais ont été mis en oeuvre au niveau des résurgences existantes.

### III-2 - Essais in-situ sur des éprouvettes de béton 2 x 2 x 16 (cm)

#### III-2-1 - Introduction.

Afin de compléter l'étude hydrochimique ainsi que l'analyse bibliographique relative à l'agressivité des eaux "de mine" vis-à-vis des bétons, et vu la complexité des phénomènes régissant cette agressivité, il paraissait indispensable de réaliser des essais in situ. Ils permettent de déterminer de manière précise l'influence de ces eaux sur les bétons, en tenant compte de tous les éléments qu'elles contiennent et des proportions dans lesquelles ils existent.

Dans ce but, nous avons pratiqué sur des éprouvettes de béton l'essai ASTM modifié par le laboratoire central des Ponts et Chaussées de Paris, tel qu'il est décrit ci dessous .

#### III-2-2- Méthode ASTM normalisée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris.

Rappelons que cette méthode, consiste à plonger des éprouvettes de mortier dans l'eau dont on veut évaluer l'agressivité, puis à mesurer leur allongement au cours du temps.

En pratique, on confectionne des éprouvettes de mortier dont la composition est la suivante :

$$\frac{\text{Poids de sable}}{\text{Poids de ciment}} = 3 \qquad \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids de ciment}} = 0,5$$

Ce mortier est coulé dans des moules (figure n°3-26) permettant de fabriquer des éprouvettes parallélipipédiques de 2 x 2 x 16 cm, munies de pastilles rectifiées, en acier inoxydable, aux extrémités. Après 24 h de durcissement, elles sont démoulées et après 28 jours d'hydratation dans de l'eau pure, leur longueur est mesurée à 10 microns près.

Ensuite, elles peuvent être placées sur le site de l'expérience.

Toutes les mesures de longueurs doivent être réalisées dans de conditions identiques de température, de manière à éviter les phénomènes de contraction thermique.

Le laboratoire central des Ponts-et-Chaussées de Paris, pour

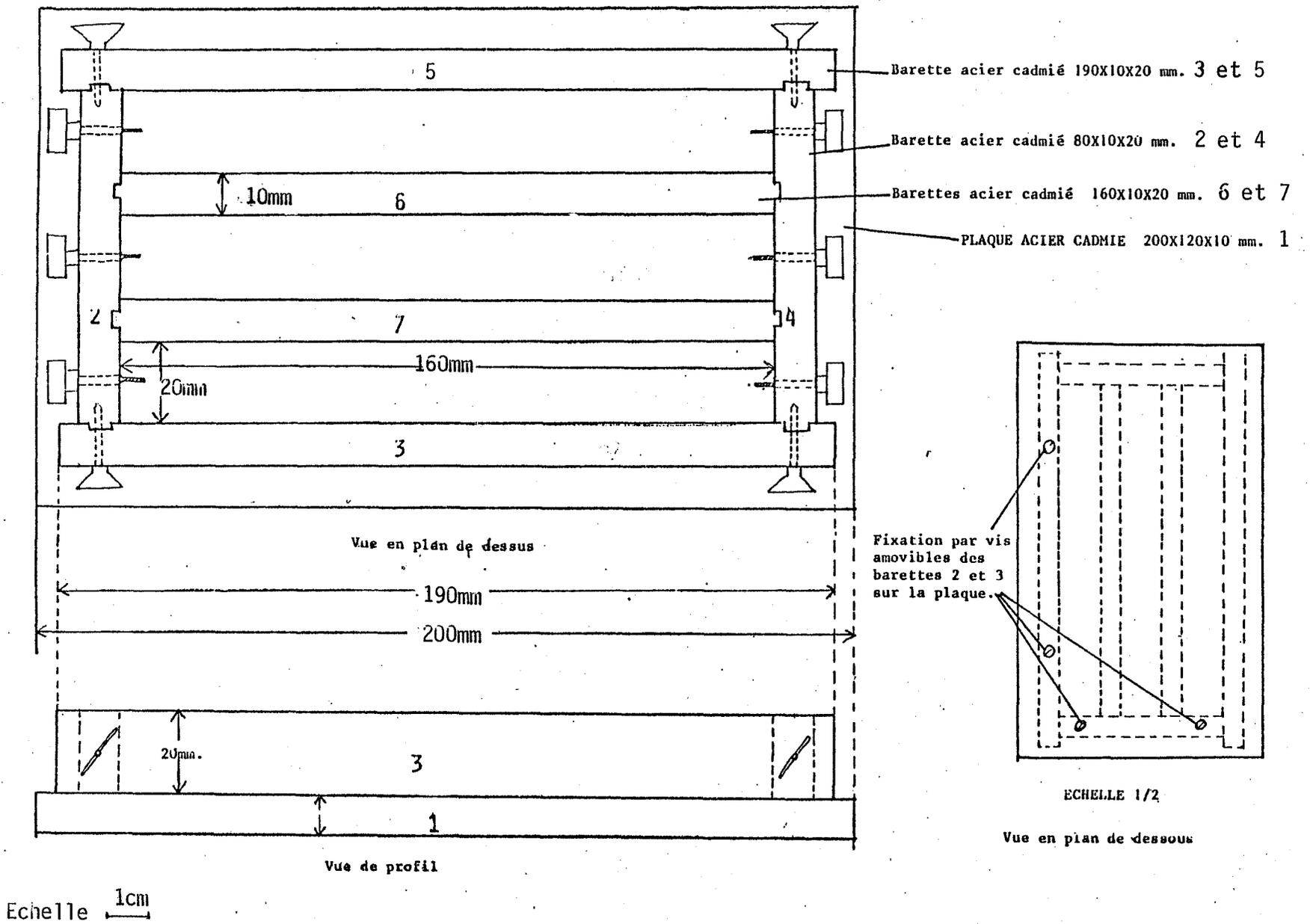


FIGURE N°3-26

Moule construit pour la fabrication des lots d'éprouvettes

normaliser ce test, a effectué des essais de gonflement sur des éprouvettes de mortier, soumises à différentes solutions de sel.

Les essais réalisés notamment avec des solutions de  $SO_4Mg$  (sulfate de magnésium) à différentes concentrations ont été prolongés sur des temps très longs (plusieurs années).

Les résultats obtenus montrent que si le seuil de gonflement est inférieur à 800 microns par mètre au bout de 6 mois, les éprouvettes ne subissent plus de variations de longueur dans la suite de l'expérience, la solution dans laquelle elles ont été mises en place peut donc être considérée comme non agressive vis-à-vis des bétons.

### III-2-3- Mise en place, outils

Rappelons que le but de l'expérience est de mettre en évidence la formation de sel de Candlot ou Ettringite ( $3CaO, Al_2O_3, 3CaSO_4, 31H_2O$ ) dans les éprouvettes de béton, qui dans le cas de solutions magnésiennes se décompose en gypse, magnésie et alumine, et s'accompagne de la formation de sulfates alcalins, de brucite ( $Mg(OH)_2$ ) et de silice hydratée. Le résultat de ces différentes réactions se caractérise, à long terme par un gonflement des éprouvettes, d'autant plus sensible que les échantillons sont petits et donc facilement attaqués.

La méthode a été mise en oeuvre avec l'aide du laboratoire d'analyses chimiques de la Centrale Thermique du Bec (Le Chambon-Feugerolles), à partir de deux ciments de nature différente :

- un ciment Portland ordinaire: PORTLAND CPJ35 (VICAT)
- un ciment CLK (résistant aux sulfates): CLK 45 (VICAT)

mélangés dans les proportions prévues à du sable normalisé AFNOR (NF P15-403) provenant de la région de Leucate (Pyrénées Orientales).

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées 24 h dans une atmosphère saturée en humidité, puis plongées 28 jours en laboratoire dans une eau non agressive.

La première mesure effectuée après ces 28 jours sert de base de comparaison pour les autres mesures.

L'essai consiste à suivre par mesures successives le gonflement ainsi que l'état de dégradation des éprouvettes de mortier réalisées à base de liant hydraulique. L'appareil utilisé pour la mesure des gonflements est un micromètre à pression d'air (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).

La précision des mesures avec cet appareil peut être estimée à  $\pm 2$  microns.

Les éprouvettes sont mesurées dans le sens de la longueur entre les deux pastilles d'acier rectifié sises à leurs extrémité.

La mesure est comparative, elle s'effectue en deux temps :

Le premier temps consiste à définir le zéro de mesure à l'aide de cales micrométriques d'une longueur proche de celle de l'éprouvette (80 microns d'écart maximum).

On met ensuite l'éprouvette en place sur la platine (figure n°3-27) et on mesure le déplacement en microns du pointeau de mesure, par rapport à la position initiale définie par les cales.

Rappelons que les mesures doivent évidemment être réalisées à température constante (20°C dans le laboratoire) et dans un temps le plus court possible afin que les éprouvettes ne soient pas exposées trop longtemps à l'air, pour éviter les phénomènes de dessiccation.

Compte tenu de la nature des éprouvettes, de la position plus ou moins bonne des pastilles placées aux extrémités (certains pastilles présentent en effet un écart allant jusqu'à 60 microns entre leur point le plus haut et leur point le plus bas), les mesures sur chaque éprouvettes sont effectuées un grand nombre de fois afin de pouvoir déterminer une moyenne fiable.

Ce principe de mesures répétées avec calcul d'une moyenne fait obligatoirement diminuer la précision, c'est la raison pour laquelle la précision des mesures a été évaluée à :

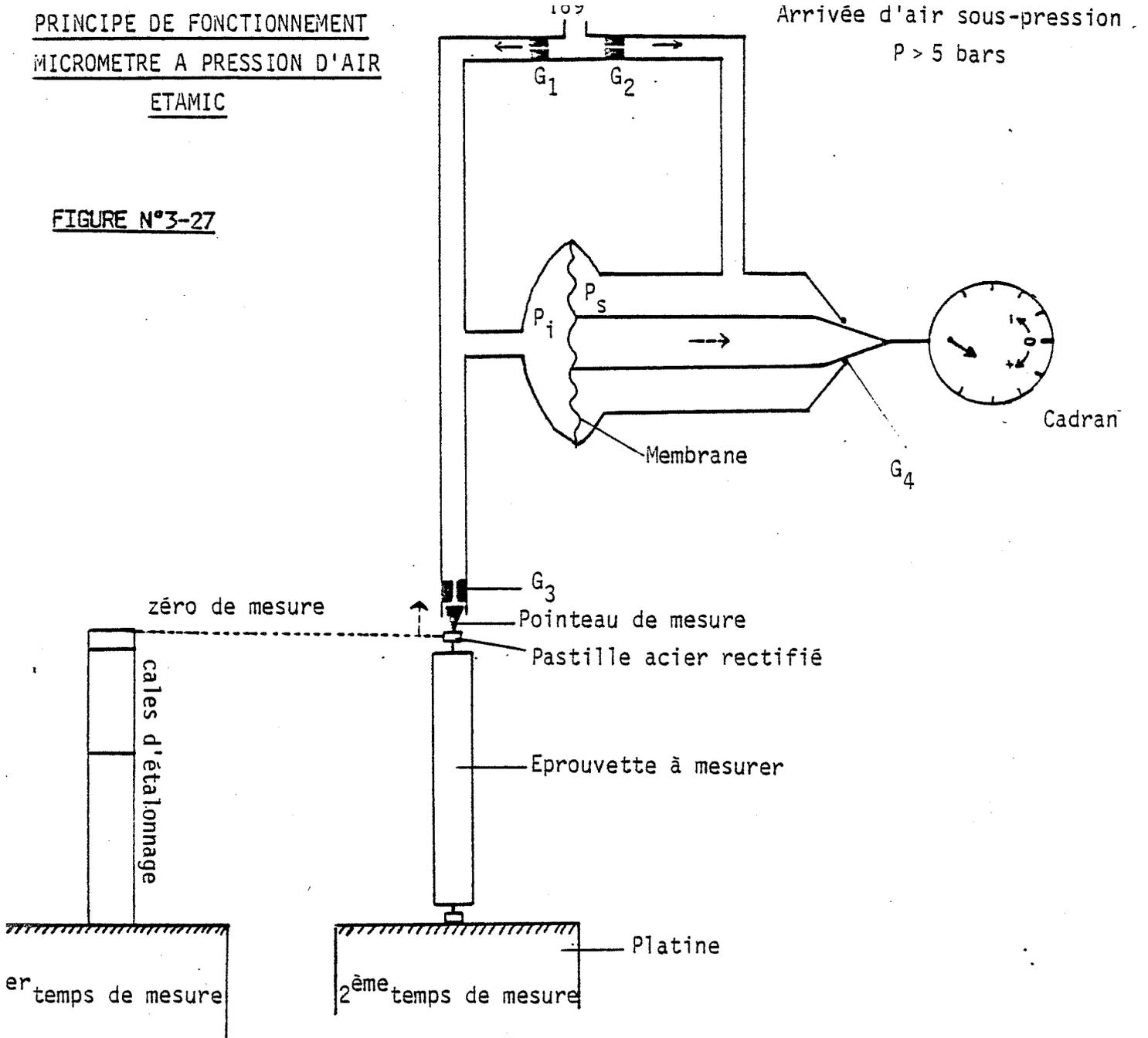
$\pm 10$  microns.

Les éprouvettes mesurées une première fois ont ensuite été réparties par lot de trois pour chaque nature de ciment de la façon suivante :

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT  
MICROMETRE A PRESSION D'AIR

ETAMIC

FIGURE N°3-27



- $G_1, G_2, G_3$  et  $G_4$  sont des gicleurs
- $P_i$  la pression inférieure à la membrane
- $P_s$  la pression supérieure à la membrane

\* A l'équilibre : définition du zéro de mesure

- Les gicleurs  $G_1$  et  $G_2$  ont des diamètres égaux et sont traversés par un écoulement sonique (les débits les traversant sont égaux et ne dépendent que du diamètre).

- Si  $G_3$  et  $G_4$  sont égaux alors  $P_i = P_s$

\* Mesure

- Si il y a mouvement du pointeau de mesure, diminuant par exemple le débit traversant  $G_3$ , alors  $P_i$  augmente.
- La membrane monte entrainant le pointeau susjacent, ce qui provoque une diminution du débit traversant  $G_4$  jusqu'au rétablissement de l'équilibre  $P_i = P_s$ .
- Le déplacement mesuré donne une indication de l'écart.
- La réponse de cet appareil est linéaire.

\* Epruvettes témoins conservées en laboratoire dans une eau non agressive:

CPJ LAB 1,2,3

CLK LAB

\* Epruvettes conservées en laboratoire dans une eau de résurgence :

CPJ RES 1,2,3

CLK RES 1,2,3

\* Epruvettes mises en place dans la résurgence du Cluzel(Saint-Etienne) :

CPJ CLU 1,2,3

CLK CLU 1,2,3

\* Epruvettes mises en place dans la résurgence de Villars :

CPJ VIL 1,2,3

CLK VIL 1,2,3

\* Epruvettes mises en place dans la résurgence de la Sauvagère (Saint-Etienne) :

CPJ SAU 1,2,3

CLK SAU 1,2,3

Un suivi analytique mensuel donne pour les eaux de ces trois résurgences la composition chimique moyenne suivante :(tableau n°3-28)

	LE CLUZEL	VILLARS	LA SAUVAGERE
Temp. (°C)	16,35	18,90	15,00
PH	7,03	6,89	6,89
E.S. (mg/l)	2226,00	3020,00	2740,00
TH (°F)	107,70	121,50	126,90
T.A.C (°F)	75,70	110,45	63,50
Ca (mg/l)	193,60	179,60	132,50
Mg (mg/l)	<u>141,50</u>	<u>187,50</u>	<u>227,60</u>
SO <sub>4</sub> (mg/l)	<u>846,00</u>	<u>1140,70</u>	<u>1400,00</u>
Cl (mg/l)	41,60	39,90	32,90
CO <sub>3</sub> H (mg/l)	921,00	1346,30	783,60
CO <sub>2</sub> (mg/l)	31,50	39,00	26,30
M.E.S. (mg/l)	23,80	10,36	16,10
Résistivité	427,50	401,25	342,50

Après la première série de mesure (série témoin), trois autres séries de mesures ont été effectuées au bout de 28 jours, trois mois puis 6 mois.

### III-2-4 - Résultats et commentaires

Les résultats sont présentés dans les tableaux n°3-29 et 3-30.

Toutes les données sont en microns. Le premier de ces tableaux donne, pour chaque éprouvette, la dimension des cales utilisées pour définir le zéro de mesure, ainsi que les valeurs extrêmes des mesures effectuées :

- mesure 1,2,3,4 : numéro de la série de mesure
- cales : dimension des cales utilisées pour définir le zéro de mesure
- inf, sup : variations minimales et maximales par rapport à la dimension de référence

Le deuxième tableau donne la valeur de la moyenne calculée pour chaque éprouvette et chaque série de mesure, suivie de l'écart entre deux séries de mesure :

- MOYENNE 1,2,3,4 : dimension moyenne des éprouvettes calculée pour chaque série de mesure
- EC.MOY 2-1,3-1, etc... : écart entre la dimension moyenne des éprouvettes pour les différentes séries de mesure

Le résultat principal, but de l'expérience, est évidemment l'écart moyen entre la première et la quatrième mesure (EC.MOY 4-1), qui nous permet de constater qu'aucune éprouvette n'a atteint le seuil de gonflement de 800 microns/mètre (128 microns par éprouvette), défini par le laboratoire central des ponts et chaussées comme étant le seuil au delà duquel une eau peut être considérée comme agressive (communication orale de M.RAVERDY).

Les autres écarts permettent de suivre l'évolution d'un même échantillon au cours de l'expérience, et de déceler une éventuelle erreur de mesure (citons par exemple l'éprouvette CLKRES3 pour laquelle une erreur a sans doute été faite au cours de la troisième série de mesure (+31,5 microns par rapport à la précédente, écart non corrélé avec la quatrième mesure qui rétablit l'équilibre avec -28,5 microns).

Seules quelques éprouvettes présentent un écart de mesure 4-1

NOM	MESURE 1			MESURE 2			MESURE 3			MESURE 4		
	CALES	INF	SUP									
CPJLAB1	169000	-32	-27	169000	-50	-10	169000	-60	-10	169000	-60	-10
CPJLAB2	169450	-52	-37	169450	-45	-20	169450	-36	-30	169450	-40	-30
CPJLAB3	168250	-10	3	168250	-15	11	168250	-10	19	168250	-4	20
CLKRES1	172700	8	15	172700	7	20	172700	-7	15	172700	-10	15
CLKRES2	168100	-80	-55	168100	-70	-10	168100	-70	-20	168100	-70	-20
CLKRES3	168500	-70	-50	168500	-60	-35	168500	-30	-2	168500	-55	-34
CPJRES1	168500	-41	-34	168500	-52	-34	168500	-28	-14	168500	-40	-30
CPJRES2	168300	-29	-9	168300	-50	5	168300	-60	8	168300	-50	-5
CPJRES3	168500	-53	-48	168500	-37	-33	168500	-32	-23	168500	-45	-30
CPJCLU1	168700	-80	-50	168700	-80	-45	168700	-50	0	168700	-50	-20
CPJCLU2	168000	-40	12	168000	-34	16	168000	-25	35	168000	-40	16
CPJCLU3	168940	-55	-7	168940	-60	0	168940	-40	6	168940	-40	-8
CLKCLU1	170600	-45	-7	170600	-24	4	170600	-20	25	170600	-25	12
CLKCLU2	169180	-27	-17	169180	-40	-9	169180	-57	-15	169180	-60	0
CLKCLU3	168700	-28	-4	168700	-38	-9	168700	-26	-10	168700	-45	-2
CPJVIL1	168700	-57	-10	168700	-53	0	168700	-60	-20	168700	-65	-15
CPJVIL2	168350	-28	-23	168350	-27	-5	168350	-19	-2	168350	-14	10
CPJVIL3	168500	-35	-19	168500	-25	-12	168500	-27	-15	168500	-20	0
CLKVIL1	170000	-26	23	170000	-30	32	170000	-31	30	170000	-27	32
CLKVIL2	171200	-65	-7	171200	-55	-3	171200	-48	5	171200	-29	14
CLKVIL3	169800	17	26	169800	14	20	169800	25	40	169800	25	37
CPJSAV1	170450	-18	2	170450	-24	13	170450	-11	35	170450	-25	22
CPJSAV2	168500	-72	-53	168500	-45	-25	168500	-35	-20	168500	-38	-26
CPJSAV3	168350	-72	-20	168350	-60	0	168350	-70	4	168350	-70	10
CLKSAV1	171700	-40	-5	171700	-50	14	171700	-30	21	171700	-24	24
CLKSAV2	170200	-77	-10	170200	-75	10	170200	-60	15	170200	-60	-12
CLKSAV3	170600	5	10	170600	23	39	170600	15	30	170600	19	29
CLKLAB	167850	-45	-32	167850	-24	-9	167850	-35	-15	167850	-45	-27

TABLEAU N° 3-29

Mesure des éprouvettes : dimensions par rapport  
au zéro de référence

NOM	MOYENNE1	MOYENNE2	MOYENNE3	MOYENNE4	EC.MOY 2-1	EC.MOY 3-1	EC.MOY 3-2	EC.MOY 4-3	EC.MOY 4-1
CPJLAB1	168970,5	168970,0	168965,0	168965,0	-0,50	-5,50	-5,00	0,00	-5,50
CPJLAB2	169405,5	169417,5	169417,0	169415,0	12,00	11,50	-0,50	-2,00	9,50
CPJLAB3	168246,5	168248,0	168254,5	168258,0	1,50	8,00	6,50	3,50	11,50
CLKRES1	172711,5	172713,5	172704,0	172702,5	2,00	-7,50	-9,50	-1,50	-9,00
CLKRES2	168032,5	168060,0	168055,0	168055,0	27,50	22,50	-5,00	0,00	22,50
CLKRES3	168440,0	168452,5	168484,0	168455,5	12,50	44,00	31,50	-28,50	15,50
CPJRES1	168462,5	168457,0	168479,0	168465,0	-5,50	16,50	22,00	-14,00	2,50
CPJRES2	168281,0	168277,5	168274,0	168272,5	-3,50	-7,00	-3,50	-1,50	-8,50
CPJRES3	168449,5	168465,0	168472,5	168462,5	15,50	23,00	7,50	-10,00	13,00
CPJCLU1	168635,0	168637,5	168675,0	168665,0	2,50	40,00	37,50	-10,00	30,00
CPJCLU2	167986,0	167991,0	168005,0	167988,0	5,00	19,00	14,00	-17,00	2,00
CPJCLU3	168909,0	168910,0	168923,0	168916,0	1,00	14,00	13,00	-7,00	7,00
CLKCLU1	170574,0	170590,0	170602,5	170593,5	16,00	28,50	12,50	-9,00	19,50
CLKCLU2	169158,0	169155,5	169144,0	169150,0	-2,50	-14,00	-11,50	6,00	-8,00
CLKCLU3	168684,0	168676,5	168682,0	168676,5	-7,50	-2,00	5,50	-7,00	-9,00
CPJVIL1	168666,5	168673,5	168660,0	168660,0	7,00	-6,50	-13,50	5,00	-1,50
CPJVIL2	168324,5	168334,0	168339,5	168348,0	9,50	15,00	5,50	8,50	23,50
CPJVIL3	168473,0	168481,5	168479,0	168490,0	8,50	6,00	-2,50	11,00	17,00
CLKVIL1	169998,5	170001,0	169999,5	170002,5	2,50	1,00	-1,50	3,00	4,00
CLKVIL2	171164,0	171171,0	171178,5	171192,5	7,00	14,50	7,50	14,00	28,50
CLKVIL3	169821,5	169817,0	169832,5	169831,0	-4,50	11,00	15,50	-1,50	9,50
CPJSAV1	170442,0	170444,5	170462,0	170448,5	2,50	20,00	17,50	-13,50	6,50
CPJSAV2	168437,5	168465,0	168472,5	168468,0	27,50	35,00	7,50	-4,50	30,50
CPJSAV3	168304,0	168320,0	168317,0	168320,0	16,00	13,00	-3,00	3,00	16,00
CLKSAV1	171677,5	171682,0	171695,5	171700,0	4,50	18,00	13,50	4,50	22,50
CLKSAV2	170156,5	170167,5	170177,5	170164,0	11,00	21,00	10,00	-13,50	7,50
CLKSAV3	170607,5	170631,0	170622,5	170624,0	23,50	15,00	-8,50	1,50	16,50
CLKLAB	167811,5	167833,5	167825,0	167814,0	22,00	13,50	-8,50	-11,00	2,50
MOY.CPJ	11,70					MOY.CLU	13,00		
MOY.CLK	10,75				CPJ	MOY.VIL	13,00		
M.CPJLAB	5,17	MOY.CLU	6,92			MOY.SAV	17,67		
M.CPJRES	9,67	MOY.VIL	13,50						
M.CLKRES	2,33	MOY.SAV	16,58			MOY.CLU	0,83		
				CLK		MOY.VIL	14,00		
						MOY.SAV	15,50		

FIGURE N°3-30

Longueur moyenne des éprouvettes par série de mesure et écart entre chaque série.

négatif, mais dans tous les cas, cet écart est inférieur à 10 microns (limite de précision des mesures), on peut donc considérer que ces éprouvettes n'ont pas subi de modifications.

Les dernières lignes de ce tableau sont consacrées au calcul des moyennes d'allongement en regroupant les éprouvettes par familles :

- MOY.CPJ : écart moyen entre la première et la quatrième série de mesure pour les éprouvettes constituées de ciment CPJ
- MOY.CLK : écart moyen entre la première et la quatrième série de mesure pour les éprouvettes constituées de ciment CLK
- M.CPJLAB: écart moyen 4-1 pour les éprouvettes constituées de ciment CPJ et conservées en laboratoire dans une eau non agressive.
- M.CPJRES: écart moyen 4-1 pour les éprouvettes constituées de ciment CPJ et conservées en laboratoire dans une eau de résurgence.
- M.CLKRES: idem pour les éprouvettes constituées de ciment CLK.
- MOY.CLU : écart moyen 4-1 pour toutes les éprouvettes mises en place dans la résurgence du Cluzel
- MOY.VIL : écart moyen 4-1 pour toutes les éprouvettes mises en place dans la résurgence de Villars
- MOY.SAV : écart moyen 4-1 pour toutes les éprouvettes mises en place dans la résurgence de la Sauvagère

Il apparait, dès la première approche que toutes les moyennes calculées sont positives et correspondent donc à un allongement des éprouvettes (même pour les échantillons conservés dans une eau non agressive). En outre, toutes ces valeurs demeurent faibles (inférieures à 20 microns) comparées à la marge d'erreur retenue de plus ou moins 10 microns.

Si l'on tente d'analyser plus finement ces résultats, on constate que les éprouvettes constituées de ciment CPJ mises en place dans des eaux de résurgence minière (MOY.CPJ=11,70) semblent légèrement plus sensibles que les éprouvettes constituées de ciment CLK (MOY.CLK=10,75).

D'autre part, les eaux de résurgences conservées en laboratoire ont moins d'influence sur les bétons que les mêmes eaux s'écoulant sur le terrain pour lesquelles le renouvellement permanent, et les variations de température plus importantes facilitent sans doute l'attaque :

$$\begin{array}{l} M.CLKRES(\text{laboratoire}) < MOY.CLK(\text{terrain}) \\ M.CPJRES \quad \quad \quad \quad \quad < MOY.CPJ \quad \quad \quad \quad \quad \end{array}$$

Les moyennes d'écart, calculées séparément pour chaque résurgence, montrent que l'eau de la résurgence de la Sauvagère semble plus "agressive" que les autres (insistons néanmoins sur le fait que toutes les mesures se situent dans un domaine de gonflement n'excédant pas 25% de la valeur limite minimum à partir de laquelle les eaux sont considérées comme agressives).

Si l'on classe ces trois résurgences par ordre d'agressivité croissante on obtient : Cluzel, Villard, Sauvagère.

Les études menées par différents auteurs montrent que le sulfate de magnésium semble être le sel le plus agressif vis à vis des bétons. Ce résultat semble se corrélérer parfaitement avec les analyses chimiques moyennes des trois résurgences étudiées, en effet (tableau n°3-28) la teneur en magnésium et en sulfate des eaux de la Sauvagère est plus importante que celle de Villars, elle même supérieure à celle du Cluzel, soit un classement parallèle à celui de l'agressivité.

On remarque enfin que la qualité du matériau déposé sur les éprouvettes durant leur immersion par les différentes résurgences n'est pas la même : le dépôt de la Sauvagère est très abondant mais beaucoup moins adhérent que celui des deux autres résurgences. Au Cluzel notamment, les éprouvettes de béton sont recouvertes d'une gangue de dépôt de couleur rouille très indurée qui joue sans doute un rôle protecteur vis-à-vis des agressions extérieures (les éprouvettes conservées dans cette résurgence ne semblent plus subir de gonflement entre la troisième et la quatrième mesure).

### III-2-5- Conclusions.

Après six mois de séjour dans des eaux de résurgence aucune des éprouvettes de béton testées n'a atteint le seuil de gonflement de 800 microns par mètre défini par le laboratoire Central de Ponts et Chaussées de Paris comme étant le seuil au delà duquel l'eau peut être considérée comme agressive.

Les éprouvette constituées de ciment CPJ semblent légèrement plus sensibles aux gonflement que celles constituées de ciment CLK.

Les eaux de la résurgence de la Sauvagère provoquent des gonflement plus importants sans doute liés à la teneur en  $SO_4^{--}$  et  $Mg^{++}$  plus élevée dans cette résurgence que dans les deux autres.

*L'expérience, débutée au mois de Mars 1984 a été poursuivie jusqu'au mois de mars 1985, pour effectuer une dernière série de mesure au bout d'un an, mesure qui n'a pas révélé d'évolution dans le gonflement des éprouvettes. Notons que certains essais auraient pu être intéressant à réaliser, notamment des essais de résistance des bétons à l'écrasement, ainsi que des observations de lames minces (au microscope polarisant) permettant de déceler la présence de cristaux d'ettringite néoformés.*

ANNEE : 1985

NOM DE L'AUTEUR (Prénom) : BLACHERÉ Agnès

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC (MONTPELLIER II)  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

RESUME :

Dans un premier tome, l'auteur étudie les impacts géologiques, hydrogéologiques et chimiques de l'arrêt de l'exhaure minière dans les dernières concessions exploitées dans le bassin houiller de la Loire.

Cette étude permet de définir une stratégie de surveillance de la remontée du niveau d'eau et de déterminer le taux d'agressivité des eaux d'émurgences vis-à-vis des bétons. Plusieurs solutions techniques sont aussi envisagées en cas d'apparition d'émurgences dans l'ensemble des concessions.

Le deuxième tome de cet ouvrage est consacré à la modélisation assistée par ordinateur du milieu. L'auteur a mis au point un logiciel utilisant la méthode des différences finies, pour une modélisation en coupe du milieu qui permet de simuler la remontée du niveau de l'eau. L'outil mis au point peut être transposé et adapté à tout site du même type.

NOTES-CLÉS :

EXHAURE

MINÉ

CHARBON

HYDROGÉOLOGIE

CHIMIE DE L'EAU

BÉTONS

MODELE MATHÉMATIQUE

SIMULATION

DIFFÉRENCES FINIES

COUPE

ACADEMIE DE MONTPELLIER  
Université des Sciences  
et  
Techniques du Languedoc

Ecole Nationale Supérieure  
des Mines de Saint-Etienne

## THESE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
pour obtenir le diplôme de Doctorat spécialité Géologie Appliquée

### **Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhaure minière**

(Vallées de l'Ondaine et du Lizeron, Bassin houiller de la Loire)

### **Modélisation mathématique du milieu**

par

**Agnès BLACHERÉ**

TOME 2

Soutenue le 21 Octobre 1985 devant le jury composé de :

M. C. DROGUE : Président

P. DAVOINE

B. BLAVOUX

A. DESBOIS

N. HONGEREAU

M. A. GIRARD

021704

# THESE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
pour obtenir le diplôme de Doctorat spécialité Géologie Appliquée



## **Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhaure minière**

(Vallées de l'Ondaine et du Lizeron, Bassin houiller de la Loire)

## **Modélisation mathématique du milieu**

par

**Agnès BLACHERÉ**

TOME 2



Soutenue le 21 Octobre 1985 devant le jury composé de :

MM. C. DROGUE : Président

P. DAVOINE

B. BLAVOUX

A. DESBOIS

N. MONGEREAU

M<sup>le</sup> M. A. GIRARD

217 PL 12

PLAN

TOME N°2

PAGE

QUATRIEME PARTIE

Modélisation du milieu assistée par ordinateur

I	- Introduction - Buts de la modélisation	178
II	- Méthodes de modélisation adoptées	
	II-1 - Présentation de cas de modélisation d'aquifères miniers	178
	II-2 - Difficultés de modélisation d'un aquifère minier	179
	II-3 - Choix des méthodes de modélisation	180
III	- Modélisation par la méthode des éléments finis	181
	III-1 - Principes de la discrétisation, rappel de la méthode	181
	III-2 - Le maillage	182
	III-3 - Présentation de la bibliothèque ELFI- Application au site étudié	183
	III-4 - Problèmes soulevés par l'adaptation de la méthode à un cas de remontée du niveau d'eau	188
	III-5 - Conclusions	190
IV	- Modélisation par le procédé des différences finies	191
	IV-1 - Rappels - équations et lois utilisées	191
	IV-2 - Présentation du logiciel	192
	IV-2-1 - Description de l'ensemble du logiciel	193
	IV-2-2 - Les données - Introduction, modifications	196
	IV-2-3 - Les programmes de calcul	198
	IV-2-3-1 - Conditions aux limites	
	IV-2-3-2 - Adaptation de la méthode à une modélisation en coupe	
	IV-2-3-3 - Les programmes	
	IV-3 - Utilisation du logiciel-simulation de l'arrêt de l'exhaure dans les vallées de l'Ondaine et du Lizeron	
	IV-3-1 -Le système étudié, les données	208
	IV-3-2 -Calage du modèle pour la concession de Roche-la-Molière	212
	IV-3-2-1 - Présentation	
	IV-3-2-2 - Choix du pas de temps	
	IV-3-2-3 - Résultats	
	IV-3-2-4 - Observations	

	PAGE
IV-3-2-5 - Comparaison entre les paramètres hydrodynamiques obtenus par simulation, et les données de terrain	
IV-3-3 - Simulation dans les autres concessions	229
IV-3-3-1 - Méthode d'estimation des paramètres hydrodynamiques	
IV-3-3-2 - Situation et description des coupes	
IV-3-3-3 - Les simulations effectuées	
IV-3-3-4 - Résultats	
V - Conclusions	251
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	254
Bibliographie	257

#### ANNEXES

N°1 : Carte-Bassin houiller de la Loire-Région occidentale et centrale-plan d'ensemble des travaux	
N°2 : Résultats des essais par pompage dans les piézomètres	264
N°3 : Coupes géologiques des piézomètres	269
N°4 : Arrêté préfectoral relatif au suivi de la remontée des eaux dans les travaux	274
N°5 : Reflexion sur la mise en place d'un système d'interprétation des données relatives au dossier de délaissement des houillères du bassin de la Loire	283
N°6 : Fiche analytique des échantillons d'eau prélevés pour le "point zéro"	289
N°7 : Processus de noyage/dénoyage	315
N°8 : Les données de la coupe Est-Ouest	319

## LISTE DES FIGURES-QUATRIEME PARTIE

- 4-1 : Discrétisation d'une coupe par la méthode des éléments finis
- 4-2 : Coupe géologique Nord-Sud
- 4-3 : Discrétisation de la coupe Nord-Sud " " "
- 4-4 : Principe de modification du maillage (programme MODIF 2)
- 4-5 : Régime permanent et régime transitoire dans l'aquifère minier
- 4-6 : Déformation du maillage Nord-Sud
- 4-7 : Enchaînement des programmes de gestion des données
- 4-8 : Unité de traitement relative au fonctionnement des programmes de calcul
- 4-9 : Exemple de fonctionnement du programme INITAB
- 4-10 : " " " MODTAB
- 4-11 : " " " LIS
- 4-12 : Conditions aux limite de type Neuman
- 4-13 : Maillage aux différences finies en coupe
- 4-14 : Procédure de calcul itératif de H
- 4-15 : Sous-programme MODEB
- 4-16 : Sous-programme IMPOT
- 4-17 : Algorithme général du programme TRANSIT
- 4-18 : Procédure de calcul de H(I,J)
- 4-19 : Maillage de discrétisation, division de Roche-la-Molière
- 4-20 : Tableau de résultat des simulations effectuées sur Roche-la-Molière
- 4-21 : Courbes de remontée simulée et mesurée dans la division de "
- 4-22 : Ecart absolu et relatif entre courbe réelle et simulée
- 4-23 : Optimisation de OMEGA
- 4-25 : Simulation de l'exhaure minière Pennsylvanie (USA)-A.S.C OWILI-EGER
- 4-26 : Valeurs de la transmissivité calées sur Roche-la-Molière
- 4-27 : Valeurs du coefficient d'emmagasinement " "
- 4-28 : Relation entre l'intensité des travaux et les paramètre T et S
- 4-29 : Courbe de remontée prévue par l'exploitant, division de Roche-la-Molière
- 4-30 : Report graphique des panneaux exploités
- 4-31 : Histogramme d'intensité des travaux
- 4-32 : Maillage coupe Nord-Sud
- 4-33 : Maillage coupe Est-Ouest
- 4-34 : Largeur des coupes matérialisée en plan
- 4-35 : Courbe de remontée jusqu'à émergence, division de Roche-la-Molière
- 4-36 : " " " " , concession de La Béraudière
- 4-37 : " " " " , Montrambert, Varenne, Malafolie
- 4-38 : Représentation des niveaux d'eau à différents pas de temps
- à-42 : de la simulation pour la coupe Est-Ouest

QUATRIEME PARTIE

MODELISATION MATHEMATIQUE DU SYSTEME

AQUIFERE MINIER

## I - Introduction, buts de la modélisation.

L'étude menée sur le site des vallées de l'Ondaine et du Lizeron a montré que le système étudié dispose d'un comportement global voisin d'un système simple pour lequel la remontée du niveau de l'eau est approximativement linéaire dans le temps. Il n'est donc pas indispensable, dans ce cas, de réaliser un modèle hydrodynamique pour prévoir la remontée du niveau de l'eau.

Cependant, il nous a paru intéressant de mettre au point un outil prévisionnel qui pourrait être utilisé de manière générale lors de n'importe quel arrêt d'exploitation.

La modélisation des systèmes aquifères miniers n'est pas une méthode nouvelle, elle a déjà été utilisée par de nombreux auteurs souvent dans le but de prévoir l'influence de la création d'une mine. Nous verrons que dans le cas d'une remontée, certaines de ces méthodes ne sont pas adaptées, et nous expliquerons le choix de la méthode utilisée.

Le modèle sera ensuite présenté tel qu'il a été mis au point, en définissant les paramètres de discrétisation du milieu, les données à introduire et en décrivant l'ensemble du logiciel ainsi que son fonctionnement.

Les résultats de différentes simulations effectuées sur le site de notre étude, afin de tester le modèle, seront ensuite exposés.

## II - Méthodes de modélisation adoptées.

### II-1 - Présentation de cas de modélisation de systèmes aquifères miniers

De nombreux travaux de modélisation en milieu minier ont déjà été entrepris pour résoudre différents problèmes inhérents à la naissance, à l'extension, ou à l'impact de mines de charbon sur l'environnement hydrodynamique.

L'étude menée par J.P.SCHUBERT (1978), pour diminuer l'importance des venues d'eau dans les mines du bassin houiller des Appalaches (U.S.A.) comporte l'élaboration d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel en plan utilisant la méthode des différences finies. La simulation des écoulements dans les couches de grès susjacentes à la zone exploitée, a permis de déduire le régime et la vitesse de filtration au travers de ces terrains ainsi que leurs relations

avec l'exhaure minière.

Les eaux d'exhaure des mines de charbon au sud de l'Inde risquaient de contaminer leur environnement hydrodynamique, A.C. CHATURVEDI (1978) a montré qu'à partir de données hydrogéologiques, un modèle mathématique établi sur ce site, pouvait constituer un outil d'évaluation et de prévision de l'influence de l'exploitation minière sur la nappe aquifère.

Plus récemment, des solutions analytiques de l'équation de diffusivité ont été étudiées par V.U. NGUYEN et A.J. RAUDVIKI (1983) pour estimer les hauteurs piézométriques et le taux d'écoulement en fonction du temps dans des exploitations minières en "découverte".

Ces trois exemples permettent de constater que la modélisation des aquifères miniers semble être une méthode couramment utilisée pour résoudre des problèmes de type très divers concernant les eaux de mine. Elle n'a par contre jamais été utilisée, à notre connaissance, pour prévoir la remontée du niveau piézométrique à la suite d'un arrêt de l'exhaure.

## II-2 - Difficultés de modélisation d'un aquifère minier

Le milieu souterrain exploité constitue un environnement excessivement hétérogène et anisotrope, compte tenu des contrastes importants existant entre les terrains très peu perméables à l'état naturel et les galeries et vides créés par l'exploitation.

A.S.C. OWILI-EGER (1975), dans ses travaux portant sur l'élaboration d'un système de simulation et de contrôle hydrodynamique de la mine et de son environnement, mentionne les principaux problèmes liés à l'exploitation de données expérimentales concernant une mine de charbon (Pensylvanie - U.S.A.). La complexité de ces problèmes est liée à différents facteurs :

- Les formations géologiques associées aux dépôts de charbon (alternance de grès, schistes, conglomérats et charbon) sont hétérogènes et anisotropes à l'état naturel.
- L'exploitation du charbon ajoute des facteurs d'anisotropie résultant, d'une part, des vides créés par l'exploitation et d'autre part, de la fracturation qui en résulte.

- Les pressions de fluide et les contraintes induites par les structures géologiques en profondeur sont imprévisibles.
- Les formations productrices sont parfois associées à des terrains susjacents à la mine de nature très différente et pouvant avoir une influence difficile à déterminer.
- Par ailleurs, la mine constitue un milieu dynamique puisque son exploitation évolue au cours du temps et dans l'espace, et que, même pour une mine dont l'exploitation a cessé, les contraintes de tassement peuvent avoir des effets différés ultérieurs à la cessation de l'exploitation.

Pour toutes ces raisons, le champ de données n'est souvent qu'approximativement représenté et difficilement utilisable. Sans tenir compte, évidemment, des particularités physiques des fluides circulant dans la mine, des effets des potentiels chimiques et thermiques, ainsi que ceux des forces d'absorption et osmotiques.

Signalons, en outre, que l'acquisition de données hydrauliques (transmissivité, coefficient d'emménagement) est relativement difficile dans un milieu exploité.

En effet les pompages d'exhaure effectués par les exploitants ne sont pas interprétables par des méthodes classiques, dans la mesure où la mine ne constitue pas un milieu saturé. R.F. RUBIO et A.Y. BALLESTER (1978) ont mis au point une méthode d'interprétation de tels pompages (rabattement constant sans filtration verticale) mais qui nécessite toutefois un champ de données important.

D'autre part, les essais de pompage effectués avant creusement d'une mine dans des terrains houillers, sont délicats à interpréter (P.R. DAVIS, W.C. WALTON - 1982) compte tenu de la faible perméabilité de ces formations et de l'hétérogénéité qui les caractérise.

### II-3 - Choix des méthode de modélisation

Si l'on considère, malgré toutes les difficultés signalées au paragraphe précédent, que le réservoir aquifère minier est assimilable à un aquifère fissuré "en petit", il peut être considéré, à grande échelle, comme un milieu continu dans son ensemble, sur lequel les lois de l'écoulement (équation de continuité et de diffusivité) peuvent être appliquées. Dans ce cas, la méthode

de modélisation choisie sera celle utilisant le procédé des différences finies qui sera exposée plus loin.

Par contre, s'il paraît intéressant de tenir compte avec plus de finesse des éléments d'anisotropie du système, et par conséquent d'envisager une description géométrique plus exacte du milieu, il sera préférable d'utiliser la méthode des éléments finis. Elle permet de représenter plus fidèlement les discontinuités ou direction d'anisotropie les plus importantes que constituent les failles, le pendage des couches, les variations d'intensité de l'exploitation etc...

Ces deux techniques de modélisation seront retenues et étudiées dans les paragraphes suivants. Cependant, outre le choix de la méthode de discrétisation du milieu, il est important de définir le plan optimal de modélisation.

Dans le cas d'un aquifère lié à la mine, les principaux facteurs pouvant influencer l'écoulement correspondent essentiellement à des discontinuités verticales.

Une modélisation en coupe semble donc la plus adaptée, car elle permet de tenir compte aisément des principales failles et de leur pendage, de la superposition éventuelle d'aquifères non liés à la mine, des différents niveaux d'exploitation et de leur intensité, des galeries de communication entre les concessions et de leur altitude etc...

### III - Modélisation par la méthode des éléments finis.

#### III-1 - Principes de la discrétisation, rappel de la méthode

Les programmes utilisés sont ceux de la bibliothèque ELFI de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (P. LAUNAY - 1981).

Il s'agit de résoudre l'équation différentielle représentant les écoulements dans un milieu poreux saturé :

$$\text{div}(K.\text{grad } \phi) = -A.\frac{d\phi}{dt} + q$$

Avec :  $K$  : vecteur des conductivités  
 $\phi$  : potentiel ou charge  
 $A$  : coefficient d'emmagasinement  
 $q$  : terme de débit.

La méthode des éléments finis consiste à définir dans un domaine un certain nombre de "sous-domaines" de taille réduite, ou éléments finis, à l'intérieur desquels les paramètres hydrodynamiques ( $K, A, Q$ ) seront considérés constants et connus. Un domaine bidimensionnel est discrétisé en éléments finis selon les noeuds d'un maillage homéomorphe d'un maillage carré (c'est-à-dire que l'on peut passer du maillage utilisé à un maillage carré par une déformation continue).

Chaque élément est ensuite discrétisé en deux triangles, supposés suffisamment petits, pour que l'on puisse considérer qu'à l'intérieur de chacun d'eux, le vecteur vitesse hydrodynamique est constant.

On obtient alors un système linéaire d'équations, caractéristique de l'état du milieu, qui est ensuite résolu par une méthode itérative.

Le programme principal de calcul de la bibliothèque ELFI restitue la piézométrie de la nappe en régime permanent ou en régime transitoire.

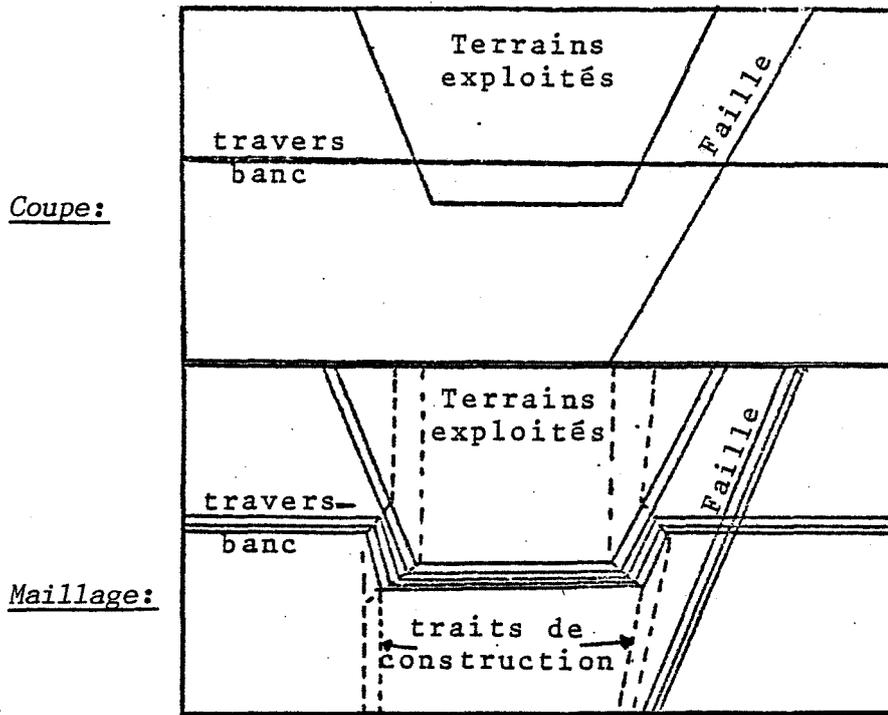
Il s'accompagne de programmes d'introduction et de modification des données, de tracé du maillage et de modification du maillage entre deux phases de calcul afin que le domaine soit toujours saturé.

### III-2 - Le maillage

Pour que le maillage choisi soit homéomorphe d'un maillage carré, toutes les lignes et les colonnes de ce maillage doivent posséder le même nombre de points. Certains cas de figures, tels les polygones concaves et les croisements, doivent être exclus.

Exemple de maillage représentant une concession, un travers-banc et une faille (figure n°4-1).

Figure n°4-1



L'agencement du maillage est tel que les caractéristiques hydrogéologiques de tous les éléments du milieu (failles, limites de concession, terrains houillers, zone de travaux, travers-bancs) soient représentés en s'inscrivant sur les noeuds de ce maillage.

Une schématisation de la réalité est toutefois recommandée afin de limiter le nombre de noeuds.

Cette méthode a pour avantage de pouvoir tenir compte du pendage, des couches de terrain, et de pouvoir représenter celles qui sont exploitées en attribuant sur les noeuds qui les délimitent des valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement caractéristiques.

### III-3 - Présentation de la bibliothèque ELFI - Application au site étudié

Les programmes de la bibliothèque ELFI ont été utilisés pour modéliser le système aquifère minier des vallées de l'Ondaine et du Lizeron. Pour cela, deux coupes ont été choisies. Elles représentent les deux directions d'écoulement principales du système et passent toutes deux par la division de Varenne, zone de convergence des écoulements.

La première, de direction Nord-Est - Sud-Ouest, traverse les

divisions de Roche-la-Molière, Varenne, et Malafolie (annexe n°1) qui constitue le point bas du système. Elle traverse trois grandes failles (Dourdel-Montsalson, Platon, Trois-Ponts), et suit les galeries de communication entre les différentes zones de travaux.

La coupe géologique et le maillage qui en résulte sont donnés pour exemple figures n°4-2 et n°4-3.

La deuxième coupe parcourt d'Ouest en Est les divisions de Malafolie, de Varenne jusqu'au puits d'Alus, longe le travers-banc de communication avec la concession de Montrambert et se termine au Nord-Est de la concession de la Béraudière.

Le but de la simulation est de déterminer le temps de remplissage des différentes zones de travaux après arrêt de l'exhaure.

Les programmes de la bibliothèque ELFI qui ont été utilisés sont les suivants :

- Le programme "INTRO2" permet l'introduction des données dans un tableau OMEGA associant à chaque point I du maillage une colonne contenant ses caractéristiques.

Le tableau OMEGA a pour dimension (8,MxN)(M:nombre de lignes,N nombre de colonnes du maillage)

ligne 1 : abscisse du point en mètres

ligne 2 : ordonnée du point en mètres

ligne 3 : perméabilité principale (C1) en m/s

ligne 4 : perméabilité principale (C2) en m/s

ligne 5 : Angle en degrés entre la direction principale correspondant à C1 et l'axe des X

ligne 6 : coefficient d'emmagasinement

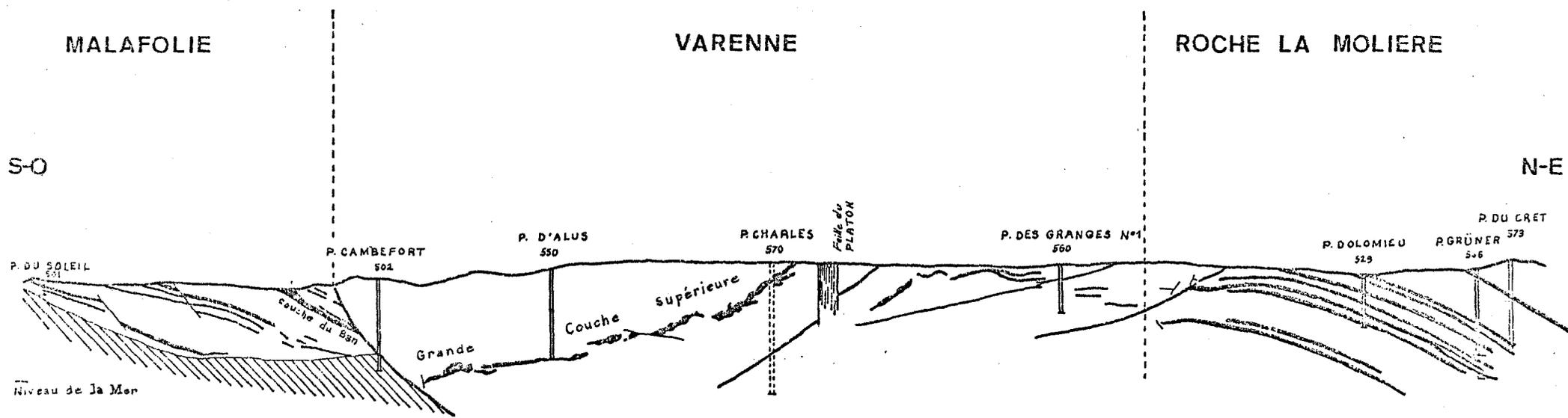
ligne 7 : débit source en  $m^3/s$  alimentant le domaine au point est positif pour une injection - négatif pour un prélèvement

ligne 8 : condition de Dirichlet :+1 si le potentiel est fixé

-1 si le potentiel n'est pas fixé

Le tableau PHI (vecteur de longueur MxN) contient les valeurs de potentiel pour tous les points du tableau (en mètres).

- "NAPLI2" : programme de lecture des données sur le fichier OMEGA, d'appel du sous-programme "SLIB2" et d'écriture des résultats sur fichier et imprimante.



COUPE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE D'APRES J. DEMAISTRE 1953

ECHELLE : 0 — 200M

LEGENDE

- |   |                                |   |                                      |
|---|--------------------------------|---|--------------------------------------|
|    | STEPHANIEEN (SCHISTES ET GRES) |    | FAILLES                              |
|  | COUCHES DE CHARBON EXPLOITEES  |  | PUITS DE MINE                        |
|  | CONGLOMERATS DE BASE           |   | LIMITES DE DIVISION OU DE CONCESSION |

FIGURE N°4-2

PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

BLACHERE. ECOLE. GRO  
1989. 0. 23 12. 45. 8

MALAFOLIE

VARENNE

ROCHE-LA-MOLIERE

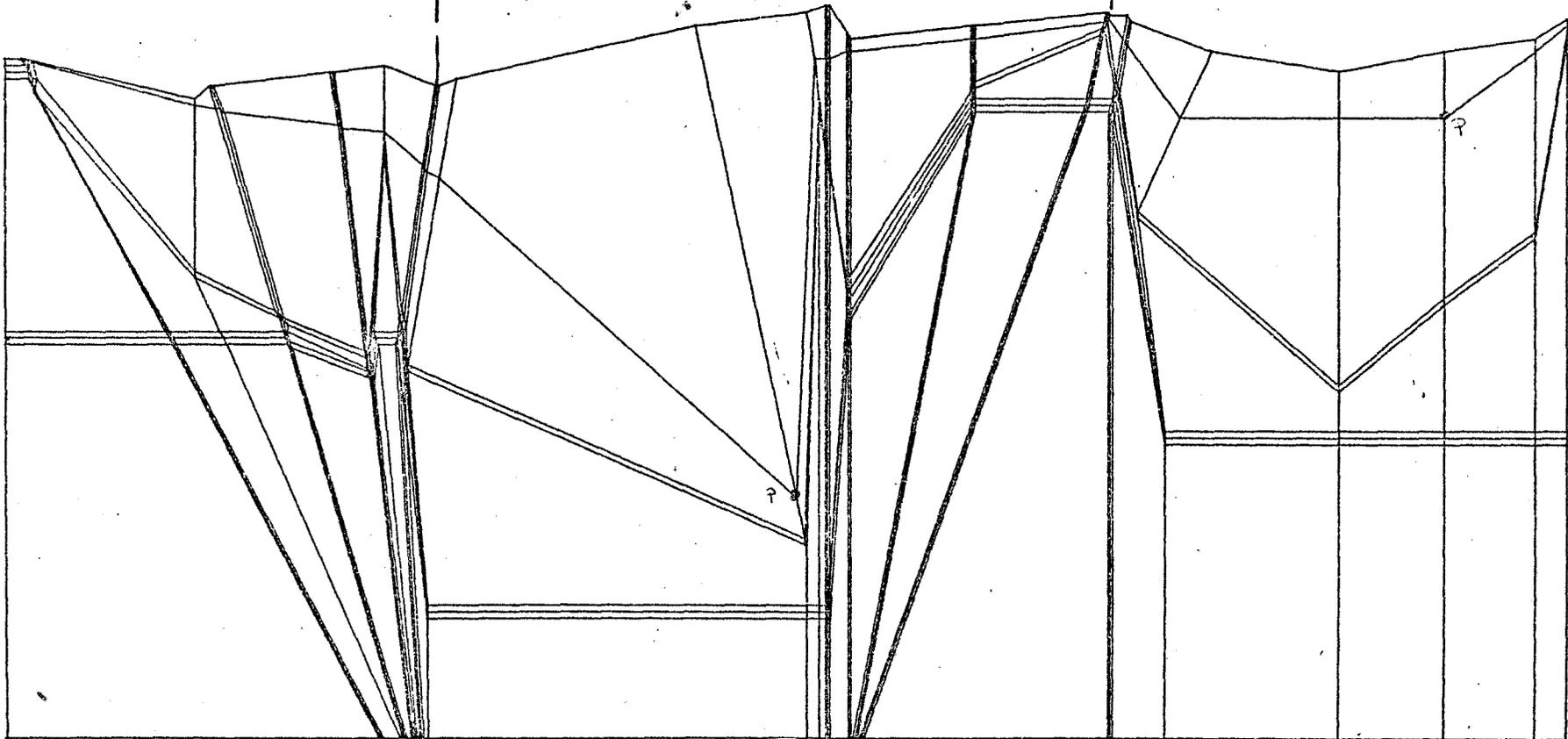


FIGURE N°4-3

- "SLIB2" : ce sous-programme gère les appels à "PBDIR2" et "MODIF2" en fonction de : - la précision souhaitée - l'écart entre la position de la surface supérieure du domaine bidimensionnel et la position de la surface supérieure de la nappe en sortie de calcul.
- "PBDIR2" : sous-programme de calcul de la répartition des potentiels et des vitesses hydrodynamiques dans un domaine bidimensionnel en coupe.
- "MODIF2" : génère un nouveau maillage, déduit du maillage initial par une déformation continue, de telle sorte que le domaine de calcul soit toujours saturé (c'est-à-dire que la cote du point le plus élevé sur chaque colonne reste toujours inférieure ou égale à la valeur du potentiel en ce point).

Les nouvelles données sont calculées par interpolation linéaire sur le segment initial qui joint deux noeuds dont l'un est noyé et l'autre dénoyé (figure n°4-4).

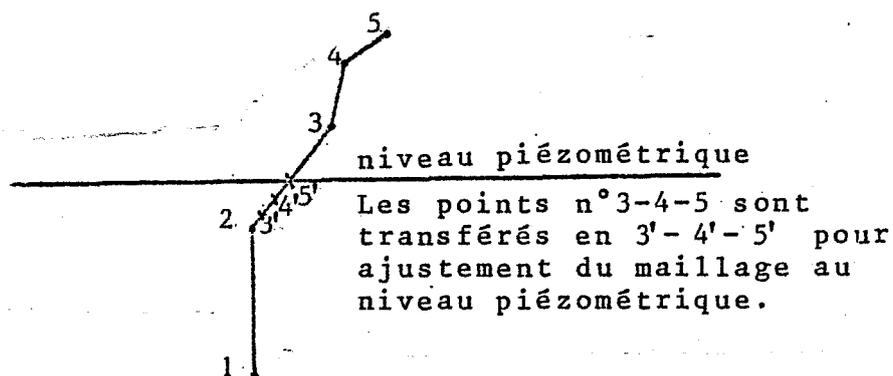


Figure n°4-4 : méthode de modification du maillage par le programme MODIF2

La technique de modélisation adoptée consiste à trouver, dans un premier temps, à partir du maillage initial, par un calcul en régime permanent, la forme de maillage représentant un état stable imposé par l'exhaure et correspondant, dans chaque concession, à un niveau d'eau maintenu à une cote déterminée par l'exhaure, ce niveau étant différent dans chaque concession.

A partir de cet état stable, les pompes d'exhaure sont arrêtées, et le niveau de l'eau monte dans les différentes concessions sous l'influence de débits d'injection correspondant aux infiltrations (figure n°4-5).

## REGIME PERMANENT ET REGIME TRANSITOIRE DANS L'AQUIFERE MINIER

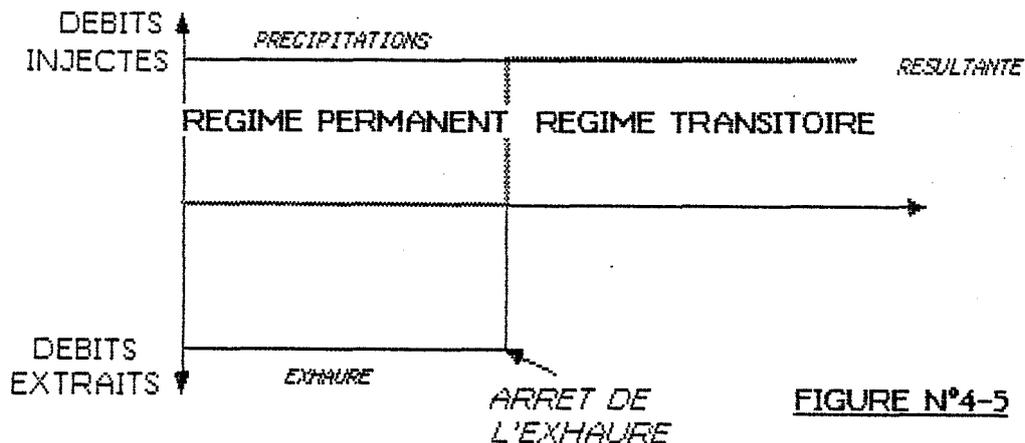


FIGURE N°4-5

III-4 - Problèmes soulevés par l'adaptation de la méthode à un cas de remontée du niveau d'eau.

Les programmes de la bibliothèque ELFI calculant les écoulements en milieu poreux saturé, le maillage sur lequel s'effectue le traitement doit toujours être saturé en eau. Il est donc nécessaire de le modifier en fonction de la position de la surface libre.

Le programme "MODIF2" est destiné à réaliser ces modifications cependant, on s'aperçoit que si la déformation des mailles est trop importante (supérieure à 80% de la taille initiale), les résultats deviennent incohérents.

Or, dans le cas d'une remontée du niveau d'eau, les modifications du maillage sont très importantes dès les premières phases de calcul (figure n°4-6), et génèrent très rapidement des inexactitudes.

A l'inverse, dans le cas d'un pompage, le milieu est saturé au départ et le maillage représentatif de la géométrie du milieu, la vidange progressive entraîne alors des modifications qui restent cohérentes avec le cas modélisé.

On constate de surcroît, dans le cas d'une remontée du niveau d'eau, l'apparition de figures redhibitoires pour la méthode des éléments finis : croisements de lignes et/ou de colonnes ou formation de polygones concaves. Ces figures génèrent un maillage qui n'est plus homéomorphe d'un maillage carré.

FICH. M2. 3

BLACHERE. ECOLE. ASS  
1963. 2. 12. 23. 51

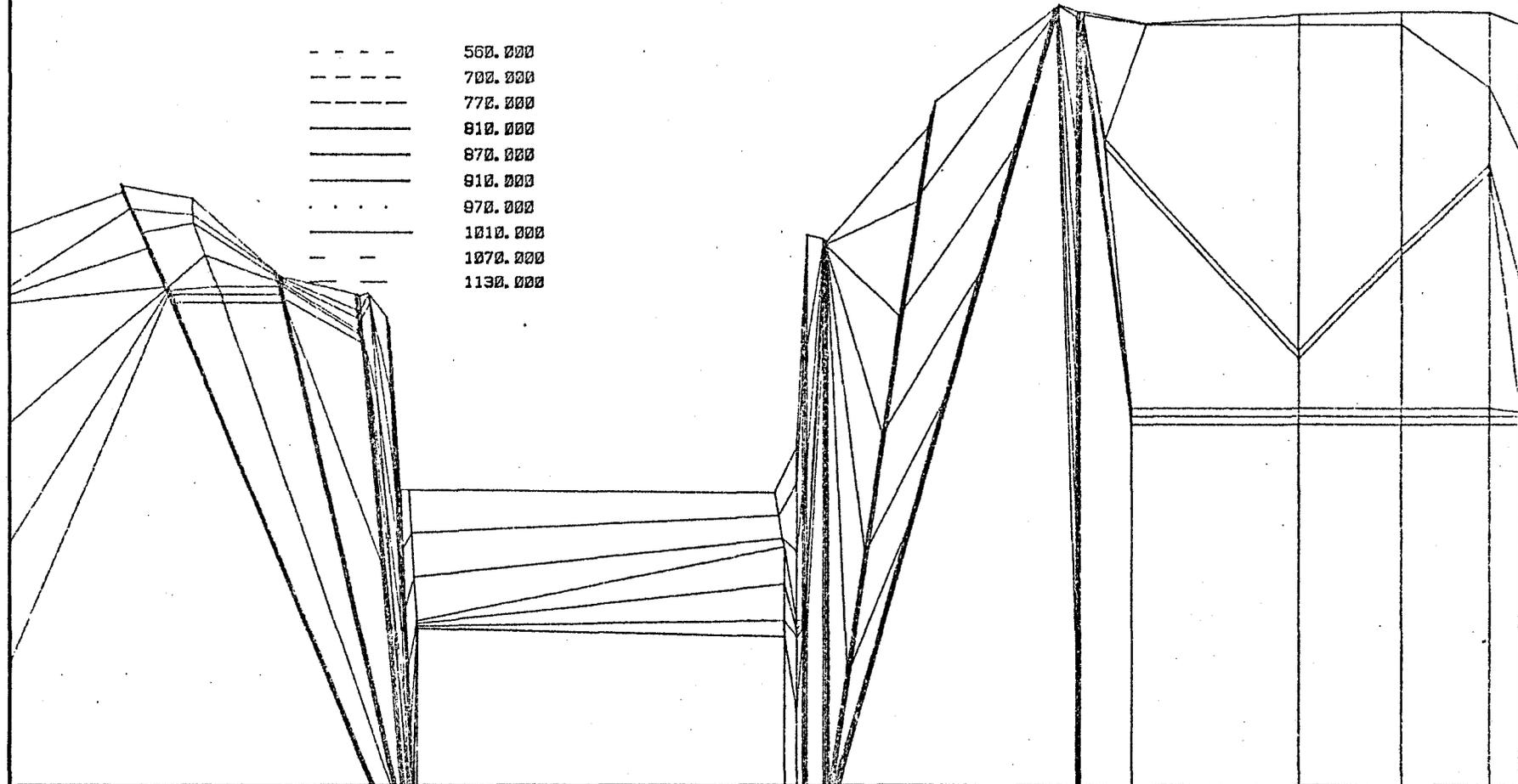
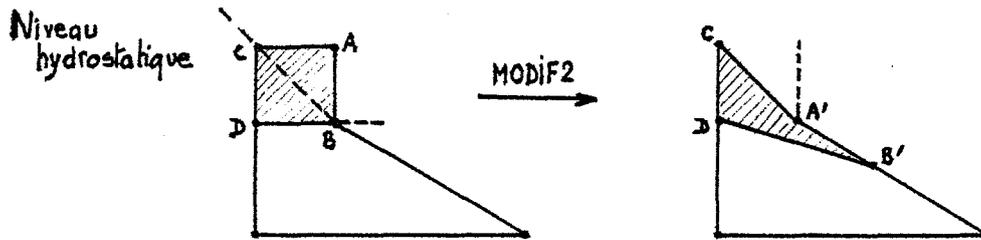


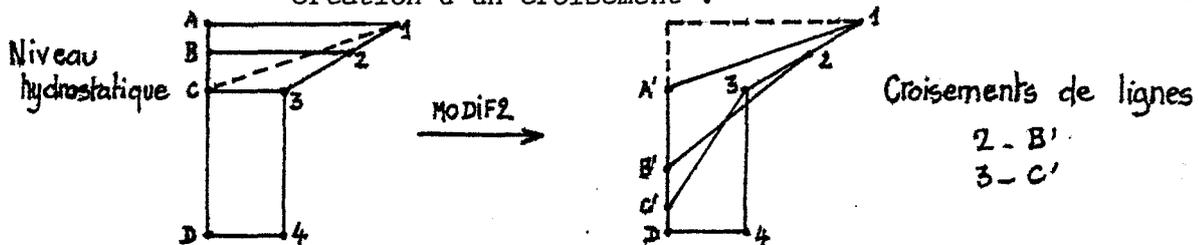
Figure n°4-6

Déformations imposées au maillage de la coupe Nord-Sud dès les premiers pas de temps simulés

Exemples : Création d'un polygone concave :



Création d'un croisement :



Il est évidemment possible de prévoir l'évolution du maillage, lors de sa conception, afin de minimiser les risques d'erreur en éliminant les cas limites provoquant la formation de figures inacceptables. On pourra en particulier limiter les ruptures de pente sur une même verticale etc...

Cependant, le maillage perd ainsi la précision de représentation géométrique qui est l'avantage des éléments finis, de plus, le nombre très important de pas de temps nécessaires au calage du modèle rend la prévision et l'utilisation de la méthode peu aisées.

### III-5 - Conclusions

Malgré ces difficultés d'adaptation à un problème de remontée du niveau piézométrique, la méthode des éléments finis reste néanmoins performante et elle a déjà fait ses preuves dans l'étude des solutions hydrauliques, de pompage et de drainage, à apporter aux problèmes hydrogéologiques en aquifères miniers (Congrès SIAMOS de Grenade - 1978)

Compte tenu des difficultés rencontrées, et qu'il nous a paru intéressant de signaler, nous avons jugé plus approprié d'orienter notre travail vers la mise au point d'un logiciel de simulation de la remontée du niveau d'eau dans un système aquifère minier, à l'aide de la méthode plus classique, dite des différences finies.

#### IV - Modélisation par le procédé des différences finies

L'essentiel de notre travail a été de mettre au point et de tester un logiciel adapté à notre problème.

Le procédé des différences finies correspond à un mode de discrétisation du milieu dont la mise en oeuvre est moins difficile que par la méthode des éléments finis. Elle est par contre moins performante puisque l'équation de diffusivité y est résolue de manière non continue sur le domaine d'étude. De plus le choix limité de la forme du maillage, ne permet pas de prendre en compte de manière précise les caractéristiques géométriques du terrain (pendage des couches, accidents tectoniques etc....).

##### IV-1 - Rappels, équations et lois utilisées

Le procédé des différences finies est un calcul approché des équations aux dérivées partielles. La dérivée de l'équation concernée, en l'occurrence l'équation de diffusivité, est remplacée par sa valeur approchée en un point. Ce procédé constitue une solution discontinue ou "discrète" par rapport à la formulation variationnelle des problèmes résolus par la méthode aux éléments finis.

Le domaine d'étude est discrétisé en un maillage comportant N noeuds auxquels sont associées N équations à N inconnues résolues numériquement par une méthode itérative (Gauss-Seidel).

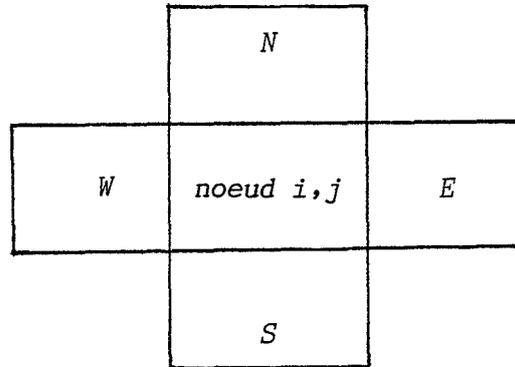
L'équation à résoudre est l'équation de diffusivité qui résulte de la combinaison de l'équation dynamique de Darcy et de l'équation de continuité. Si l'on travaille en coupe dans le sens de l'écoulement ( $\frac{h}{y} = 0$ ), et en prenant une épaisseur d'aquifère "e" suivant l'axe y l'écoulement est alors bidimensionnel et l'équation prend la forme suivante :

$$\frac{d(K_x \delta h)}{dx \delta x} + \frac{d(K_z \delta h)}{dz \delta z} = S \cdot \frac{\delta h}{\delta t} + q(x,z,t)$$

avec :

- S = coefficient d'emménagement de l'aquifère (sans dimension)  
= e.S<sub>s</sub> (coefficient d'emménagement spécifique)
- T<sub>x</sub> = e.K<sub>x</sub> transmissivité de l'aquifère suivant l'axe des x en m<sup>2</sup>/s
- T<sub>z</sub> = e.K<sub>z</sub> transmissivité de l'aquifère suivant l'axe des z en m<sup>2</sup>/s
- q(x,z,t) : somme algébrique des débits injectés ou prélevés dans un élément unitaire de volume d'aquifère à l'instant t.

Une telle équation n'admettant pas de solution analytique, le procédé des différences finies consiste à discrétiser le milieu selon un maillage rectangulaire et à calculer la valeur du potentiel uniquement pour les noeuds du maillage.



Pour chaque maille l'équation à résoudre en régime permanent est alors la suivante:

$$H(i,j) = \frac{A1.PW.HW + B.PN.HN + C1.PE.HE + D.PS.HS}{A1.TW + B.TN + C1.TE + D.TS}$$

- $H(i,j)$  potentiel hydraulique au noeud de la ligne  $i$  et de la colonne  $j$
- $PW, PN, PE, PS$  transmissivité équivalentes de la face Ouest, Nord, Est, Sud
- $HW, HN, HE, HS$  potentiels hydrauliques des différentes faces.

Le nombre de mailles mises en jeu nécessite une approche des solutions par méthode itérative, avec un procédé de surrelaxation par points (F. GHASSEMI 1974) qui permet d'accélérer la convergence :

$$H_{i(pond)}^n = \omega . H_i^n + (1 - \omega) . H_i^{n-1}$$

- $n$  : numéro de l'itération en cours
- $\omega$  : coefficient de surrelaxation compris entre 1 et 2

#### IV-2 - Présentation du logiciel

Le programme de simulation de la remontée du niveau piézométrique a été conçu de manière à bénéficier des avantages d'un système interactif qui sont :

- La facilité de saisie des données
- La possibilité offerte de mettre à jour ces données à n'importe quel pas de temps de la simulation.
- L'autorisation de sélectionner un fichier ou un autre pour consultation.

Un système interactif de modélisation assistée par ordinateur, est un outil au moyen duquel l'opérateur "dialogue" avec l'ordinateur au cours du déroulement du programme. On citera celui élaboré par GL.BLOOMSBURG et R.E.RINKER - 1983 qui souligne les avantages de son utilisation pour la simulation hydrodynamique, l'exemple cité concerne d'ailleurs le domaine minier.

#### IV-2-1 - Description de l'ensemble du logiciel :

Les figures 4-7 et 4-8 résument les différents éléments informatiques qui composent la structure du logiciel établi. On comprendra aisément que la modélisation d'un milieu aussi complexe que celui étudié rend indispensable, dans le cadre des méthodes d'approche envisagées, une organisation informatique adaptée au traitement des données géologiques et minières.

Au total, six programmes sont nécessaires pour effectuer la simulation de la remontée du niveau piézométrique dans les concessions minières étudiées.

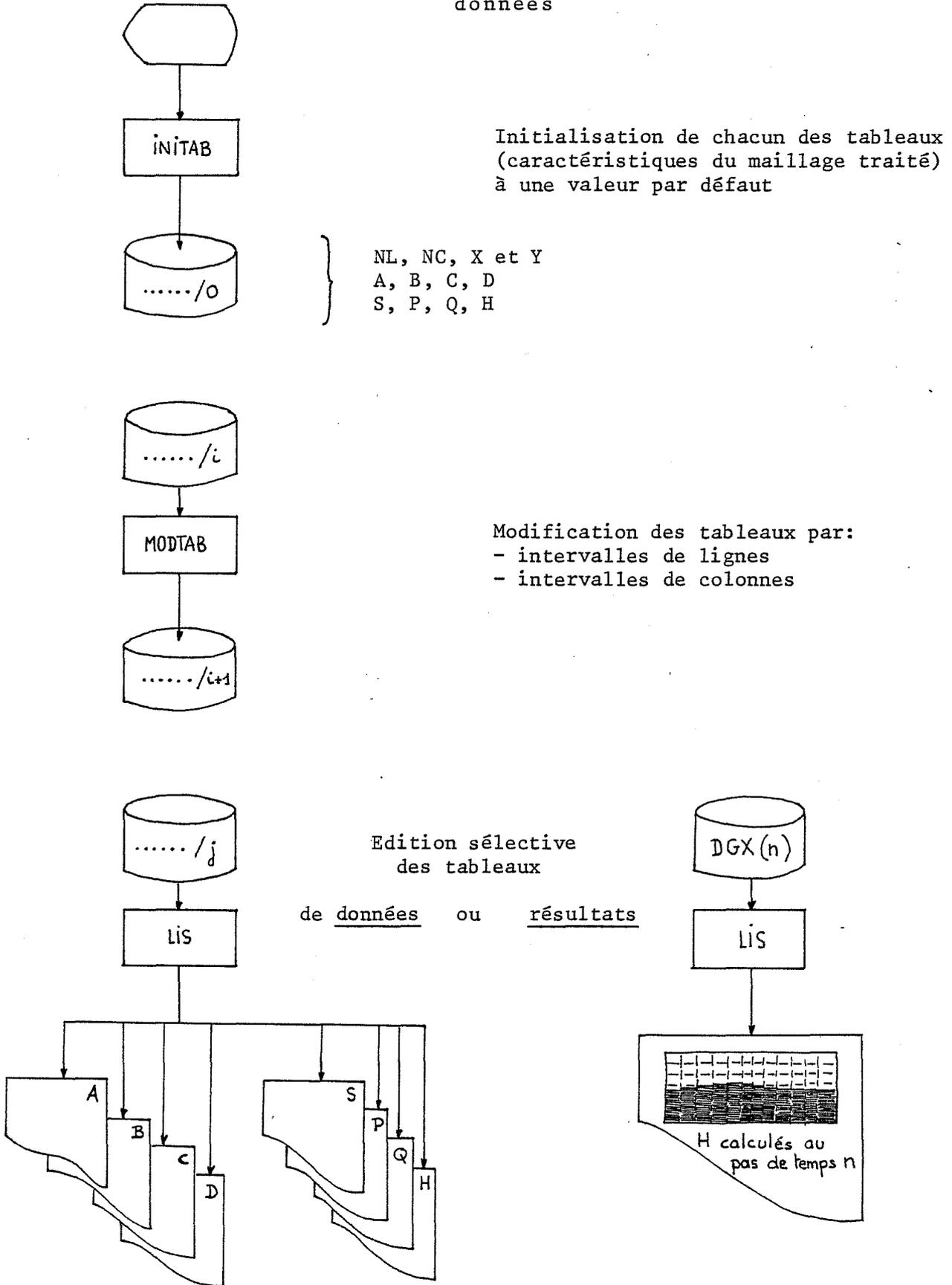
On distingue un programme d'initialisation commun à tous les tableaux de données : programme "INITAB".

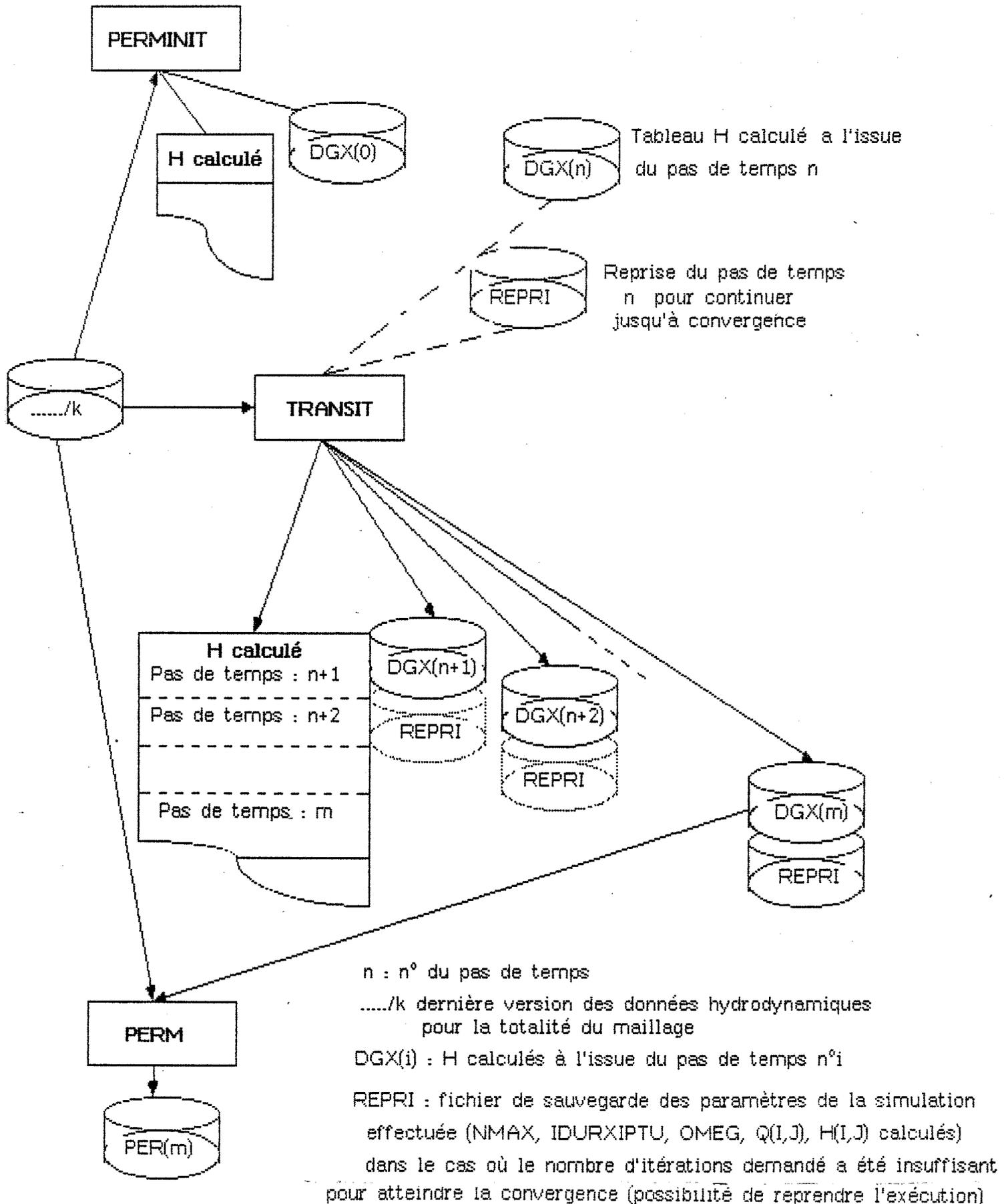
Le programme "MODTAB" assure la modification de ces tableaux. C'est lui qui permet au modéliste d'ajuster les caractéristiques des terrains (T, S) pour caler le modèle.

Le programme "LIS" est utilisé pour l'édition sélective des tableaux de données ou de résultats.

Enfin les programmes "PERMINIT", "PERM" et "TRANSIT" sont les programmes de calcul par lesquels la simulation est lancée. Ils calculent la répartition des potentiels en régime permanent ou transitoire et effectuent automatiquement une sauvegarde dans des fichiers numérotés au fur et à mesure.

Figure n°4-7 : Enchaînement  
des programmes de gestion des  
données





**Figure n°4-8 : UNITE DE TRAITEMENT RELATIVE AU FONCTIONNEMENT DES PROGRAMMES DE CALCUL EN REGIME PERMANENT ET EN REGIME TRANSITOIRE**

IV-2-2 - Les données - Introduction, modifications

Les données à saisir correspondent aux paramètres nécessaires à la représentation des caractéristiques hydrodynamiques de chaque noeud du maillage sur lequel s'effectue le calcul.

On utilise le programme "INITAB" qui génère un fichier séquentiel non formaté dans lequel il enregistrera les données introduites.

- La première ligne du tableau créé reçoit les paramètres NL, NC, X, Y :  
 NL correspond au nombre de lignes du maillage  
 NC correspond au nombre de colonnes du maillage  
 X représente la taille de la maille à l'horizontale  
 y représente la taille de la maille à la verticale.
- Les lignes suivantes sont consacrées aux tableaux :
  - \* A(NL,NC), B(NL,NC), C(NL,NC), D(NL,NC) : A, B, C, D sont des entiers sans unité compris entre 0 et 2, ils représentent le coefficient pondérateur du flux respectivement sur les faces ouest, nord, est et sud de la maille.
  - \* S(NL,NC) : coefficient d'emménagement des mailles (sans unité) est égal au coefficient d'emménagement spécifique multiplié par 1000 m. (épaisseur de l'aquifère suivant l'axe Y).
  - \* P(NL,NC) : transmissivité ( $m^2/s$ ) est égale à la perméabilité du milieu multipliée par 1000 m. (épaisseur de l'aquifère suivant l'axe Y).
  - \* Q(NL,NC) : Débit injecté ou prélevé dans la maille ( $m^3/s$ ) sera positif pour un prélèvement et négatif pour une injection. Ils correspondent soit à la pluviométrie pondérée en fonction de la surface au sol de la coupe modélisée (pluie efficace x surface de la coupe au sol) répartie sur différentes mailles, soit aux pompes d'exhaure des houillères de même pondérés par la surface de la coupe au sol (débit d'exhaure connu x surface de la coupe au sol / surface réelle de la concession).
  - \* H(NL,NC) : Piézométrie initiale en mètres.

Le programme "INITAB" fonctionne, comme tous les autres, de manière interactive. Pour chaque tableau, il propose une initialisation des

EXEMPLE DE FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME INITAB

C&gt;INITAB

NOM DU FICHIER CREE (12 Caracteres) ?  
 DONNEE  
 NOMBRE DE LIGNES ET DE COLONNES (2 I4)  
 00050010  
 VALEUR DE X (largeur de maille)  
 VALEUR DE Y (hauteur de maille) en 2F5.0  
 010.0010.0  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR A (I4) ?  
 2  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 O  
 NL ET NC: 5 10  
 MODIFICATION DU TABLEAU PAR :  
 LIGNES (Repondre L) OU PAR COLONNES (C) ?  
 C  
 DONNER UN NUMERO (EN I4)  
 E LIGNE OU DE COLONNE SELON LE CHOIX FAIT)  
 0002  
 DEFINIR L INTERVALLE (2I4) POUR LA COLONNE: 2 DE RANG= 1  
 00020004  
 DEFINIR L INTERVALLE (2I4) POUR LA COLONNE: 2 DE RANG= 2  
  
 DONNER UN NUMERO (EN I4)  
 E LIGNE OU DE COLONNE SELON LE CHOIX FAIT)  
  
 DONNER LA NOUVELLE VALEUR (I4) POUR :  
 LA COLONNE: 2 ENTRE LES LIGNES: 2 ET 4  
 EN REMPLACEMENT DE:  
 2 2 2  
 O  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR B (I4) ?  
 2  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR C (I4) ?  
 2  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR D (I4) ?  
 2  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR S (F12.0) ?  
 0.0001  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR P (F12.0) ?  
 0.002  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR Q (F12.0) ?  
 0.00  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N  
 VALEUR PAR DEFAUT POUR H (F12.0) ?  
 0.00  
 VOULEZ VOUS MODIFIER CE TABLEAU ? (O/N)  
 N

FIGURE N°4-9

Stop - Program terminated.

données à une valeur unique correspondant à la valeur qui apparaîtra le plus souvent dans le tableau. Il donne ensuite la possibilité de modifier le tableau initial par ligne ou par colonne (figures n°4-7 et 4-9).

Le fichier créé peut ensuite être modifié au cours du calage par l'intermédiaire du programme "MODTAB" qui lit le tableau en entrée et propose, de la même manière que "INITAB", une modification des valeurs. Un nouveau fichier est créé pour recevoir les valeurs modifiées (figures n°4-7 et 4-10).

Pour pouvoir consulter les fichiers de données, il a été nécessaire de mettre au point le programme "LIS" qui permet l'affichage de leur contenu sur l'écran et sur imprimante.

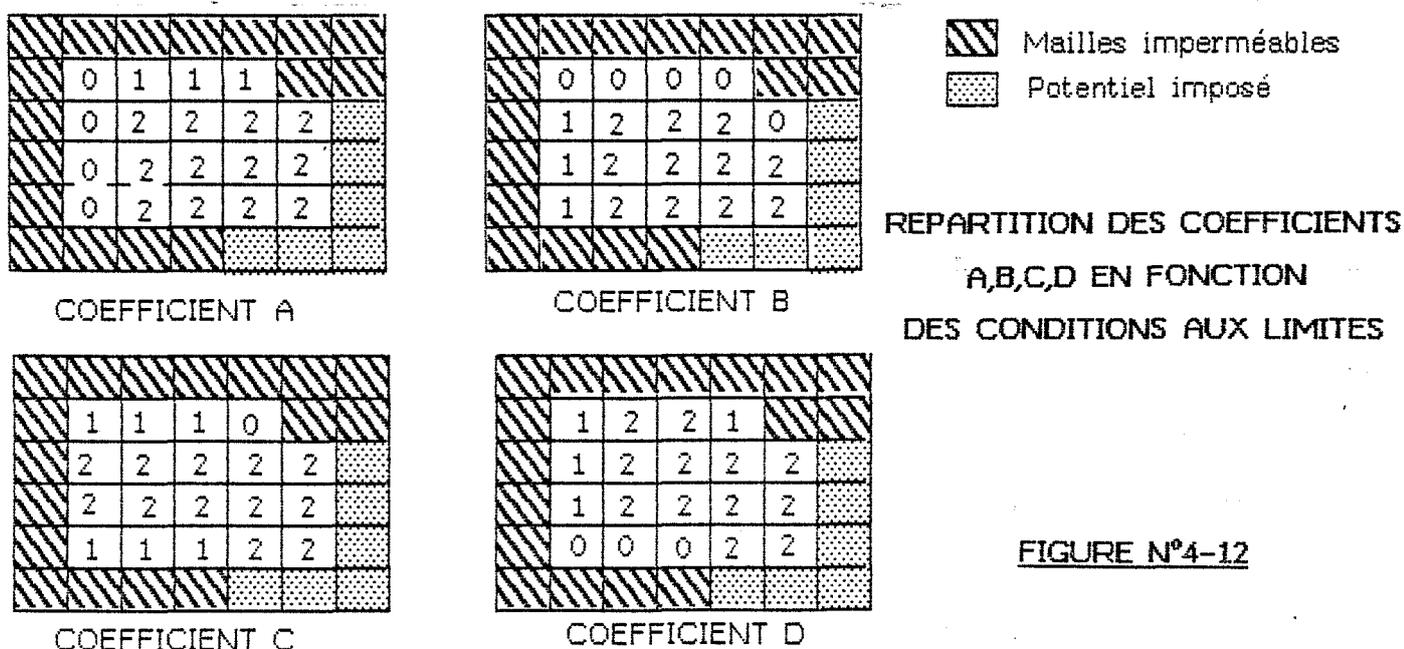
Le fonctionnement interactif de ce programme permet une édition sélective des tableaux A, B, C, D, S, P, Q, H (figure n°4-7 et 4-11) ainsi que l'édition des fichiers de résultat des programmes "PERMINIT", "PERM" et "TRANSIT".

Les données introduites, vérifiées, modifiées sont prêtes à être utilisées pour la simulation.

#### IV-2-3 - Les programmes de calcul

##### IV-2-3-1 - Conditions aux limites

Les conditions aux limites de type NEUMAN peuvent être imposées à l'aide des paramètres A, B, C, D. Egaux à 2 dans des conditions normales, leur valeur varie si la maille se situe sur une limite imperméable (figure n°4-12).



Les programmes de calcul sont structurés de façon à permettre l'imposition de certains potentiels (condition aux limites de type DIRICHLET). Les mailles pour lesquelles le potentiel est imposé présentent alors une valeur de potentiel négative :  $-H(I,J)$

D'autre part, dans un milieu tel que les terrains houillers, il existe un certain nombre de failles qui constituent des écrans étanches aux écoulements. Les mailles représentant ces failles sont repérées dans le maillage par leur coefficient de transmissivité nul, et leur valeur de potentiel imposé à  $-1.$ , elles ne font pas l'objet de calcul du potentiel.

#### IV-2-3-2 - Adaptation de la méthode à une modélisation en coupe

Le fait de modéliser en coupe le domaine d'étude implique que le niveau statique de la nappe se situe dans le plan modélisé et que certaines mailles peuvent être dénoyées ou partiellement noyées (figure n°4-13).

Ce problème induit, comme dans le cas des éléments finis, une adaptation du maillage au niveau de l'eau (programme "MODIF2" pour la bibliothèque ELFI), en conséquence, les programmes de calcul prévoient la possibilité de noyer ou de dénoyer un certain nombre de mailles en fonction de la piézométrie calculée.

La direction de la coupe représentant la direction de l'écoulement dans le milieu, les isopièzes sont des lignes pseudo verticales dans le plan modélisé.

L'option noyage/dénoyage intervient donc dans le cadre d'une verticale dans le maillage (pour un J fixé).

Cette procédure spécifique constitue un sous-programme (sub-routine "NOY") intégré au programme "PERMINIT", pour les programmes "PERM" et "TRANSIT" elle intervient pour chaque maille et à chaque itération dans le cadre du programme principal.

Il s'agit de tester pour chaque maille, si elle correspond à la dernière maille noyée sur la verticale du maillage à laquelle elle appartient :

- A partir de la piézométrie dans la maille, on détermine le nombre de mailles noyées sur la verticale :  $XN = H(I,J)/Y + 1/2.$

C&gt;MODTAB

EXEMPLE DE FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME MODTAB

NOM DU FICHIER ENTREE (12 C)  
 DONNEE  
 NOM DU FICHIER SORTIE (12 C)  
 DONNEES  
 MODIFICATION DE A ?  
 N  
 MODIFICATION DE B ?  
 N  
 MODIFICATION DE C ?  
 N  
 MODIFICATION DE D ?  
 N  
 MODIFICATION DE S ?  
 N  
 MODIFICATION DE P ?  
 N  
 MODIFICATION DE Q ?  
 N  
 MODIFICATION DE H ?  
 O  
 NL ET NC: 5 10  
 MODIFICATION DU TABLEAU PAR :  
 LIGNES (Repondre L) OU PAR COLONNES (C) ?  
 L  
 DONNER UN NUMERO (EN I4)  
 E LIGNE OU DE COLONNE SELON LE CHOIX FAIT)  
 0002  
 DEFINIR L INTERVALLE (2I4) POUR LA LIGNE: 2 DE RANG= 1  
 00020006  
 DEFINIR L INTERVALLE (2I4) POUR LA LIGNE: 2 DE RANG= 2  
  
 DONNER UN NUMERO (EN I4)  
 E LIGNE OU DE COLONNE SELON LE CHOIX FAIT)  
 DONNER LA VALEUR (F12.0) POUR:  
 LA LIGNE: 2 ENTRE LES COLONNES: 2 ET 6  
 EN REMPLACEMENT DE:  
 .000000 .000000 .000000 .000000 .000000  
 15.00  
 MODIFICATION DE H ?  
 O  
 NL ET NC: 5 10  
 MODIFICATION DU TABLEAU PAR :  
 LIGNES (Repondre L) OU PAR COLONNES (C) ?  
 C  
 DONNER UN NUMERO (EN I4)  
 E LIGNE OU DE COLONNE SELON LE CHOIX FAIT)  
 0007  
 DEFINIR L INTERVALLE (2I4) POUR LA COLONNE: 7 DE RANG= 1  
 00020004  
 DEFINIR L INTERVALLE (2I4) POUR LA COLONNE: 7 DE RANG= 2  
  
 DONNER LA VALEUR (F12.0) POUR:  
 LA COLONNE: 7 ENTRE LES LIGNES: 2 ET 4  
 EN REMPLACEMENT DE:  
 .000000 .000000 .000000  
 -17.00  
 MODIFICATION DE H ?  
 N  
 Stop - Program terminated.

FIGURE N°4-10

C&gt;LIS

FIGURE N°4-11

NOM DU FICHIER (12 C)

DONNEES

NB LIGNES= 5

NB COLONNES= 10

LARGEUR: 10.0 ET HAUTEUR: 10.0

EXEMPLE DE FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME LIS

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?A

O

2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	0	0	0	2
2	2	2	2	2

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?B

N

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?C

N

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?D

N

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?S

O

.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100
.000100	.000100	.000100	.000100	.000100

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?P

N

\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?Q

N

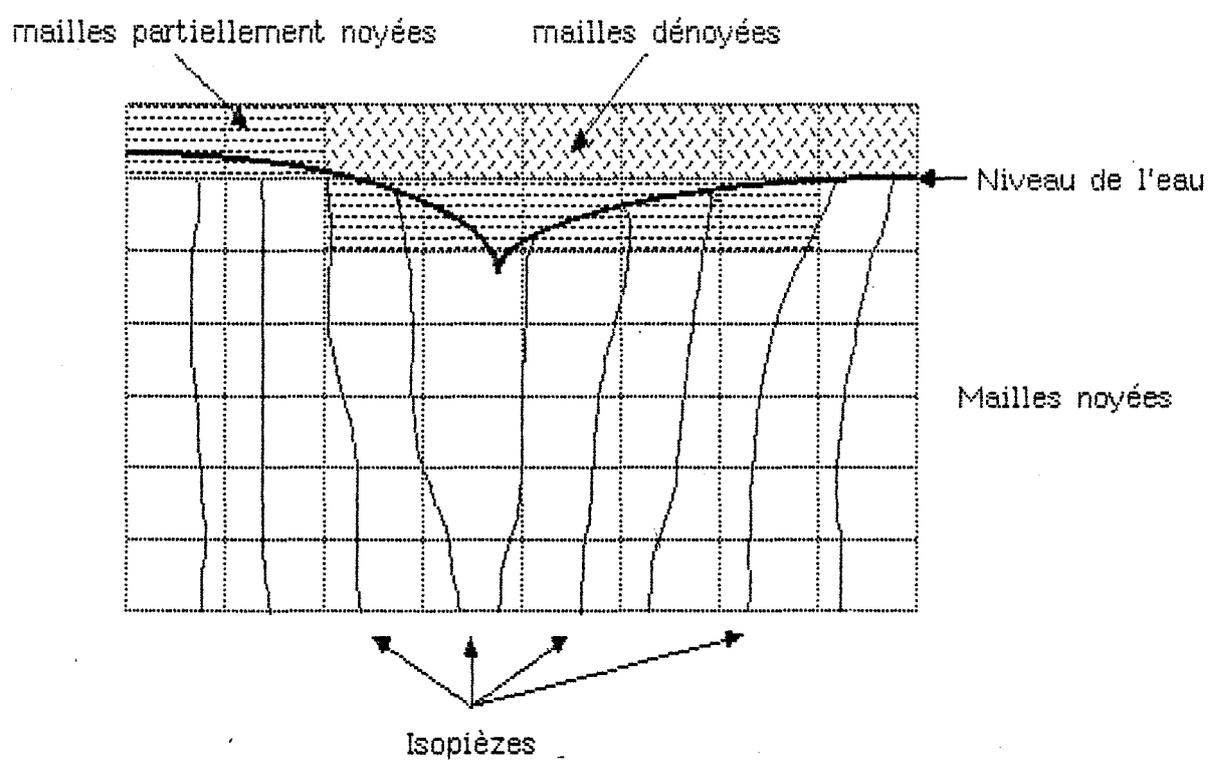
\*\*\*\*\*

DITER LE TABLEAU ?H

N

\*\*\*\*\*

Stop - Program terminated.



MAILLAGE AUX DIFFERENCES FINIES EN COUPE

FIGURE N°4-13

Soit un nombre entier de mailles dénoyées :

$$N1 = NL - (1 + \text{partie entière de } XN).$$

- On ajuste ensuite les valeurs de H, sur cette colonne, soit en dénoyant les mailles qui doivent l'être, soit en noyant les mailles supérieures.

L'annexe n°7 décrit plus en détail ce processus.

D'autre part, les coefficients pondérateurs du flux A et C permettent de pondérer le flux sur les faces est et ouest des mailles partiellement noyées. Cette option particulière concerne toutes les dernières mailles noyées d'une verticale à chaque itération aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

Les coefficients A et C sont recalculés en fonction du potentiel de la façon suivante :

- XN donne le nombre de mailles noyées sur la verticale
- La partie décimale de XN correspond donc à la partie noyée de la dernière maille.

Exemple :  $XN = 5,2$  donc 5 mailles sont totalement noyées et la dernière est noyée sur une hauteur égale à  $Y \times 0,2$ .

Soit des coefficients  $A_1 = A \times 0,2$  et  $C_1 = C \times 0,2$

Les deux options exposées ci-dessus présentent cependant un inconvénient au niveau de l'introduction des données. En effet, il faut prendre garde de fournir pour origine des piézométries, non pas le niveau de la mer (altitude NGF) mais la maille n° NL du maillage .

#### IV-2-3-3 - Les programmes de calcul

Les programmes "PERMINIT" et "PERM" sont deux programmes de calcul des potentiels en régime permanent (équilibre des flux) légèrement différents l'un de l'autre en fonction de leur place dans le déroulement de la simulation.

\*"PERMINIT"

Le programme "PERMINIT", à partir d'informations contenues dans le fichier initial des données, calcule la piézométrie sur tout le maillage en fonction des quelques noeuds à potentiel ou débit connu et imposé. Il effectue ensuite à l'aide du sous-programme "NOY" les noyages et dénoyages nécessaires.

Cette méthode facilite l'introduction des données dans la mesure où il suffit d'imposer les potentiels sur quelques verticales connues pour obtenir en quelques itérations un tableau de potentiels cohérent (figures n°4-8, 4-14, 4-15, 4-16).

\*"PERM"

Le programme "PERM", conçu sur le même plan que le programme "TRANSIT", permet d'effectuer un calcul en régime permanent entre deux pas de temps en transitoire par exemple, ou bien à la suite du programme "PERMINIT" (figure n°4-8).

"PERM" saisit les paramètres de simulation dans le fichier de données initial puis propose des modifications de la variable Q (débits) à l'aide du sous-programme "MODDEB" (figure n°4-15). Il acquiert ensuite les valeurs de la variable H calculées soit dans le pas de temps précédent soit à l'issue du programme "PERMINIT", et propose, pour celles-ci, une modification de la répartition des potentiels éventuellement imposés : sous-programme "IMPOT" (figure n°4-16).

La saisie et la modification des données étant terminées, la suite du programme est consacrée au calcul des potentiels pour chaque noeud non dénoyé du maillage, accompagné d'une surrelaxation de la valeur calculée (figure n°4-14).

Si la maille traitée est la dernière maille noyée sur la verticale, elle subira alors le processus de noyage/dénoyage en tenant compte de la présence éventuelle de failles imperméables sur la verticale, présence qui limite le nombre de mailles sur lesquelles doit s'effectuer le processus (annexe n°7).

Tout le maillage est ainsi calculé au cours d'une itération, à la suite de quoi on effectue le test de convergence. Le calcul s'arrête si la convergence ou si le nombre d'itérations maximum demandé sont atteints.

Procédure de calcul itératif du tableau H

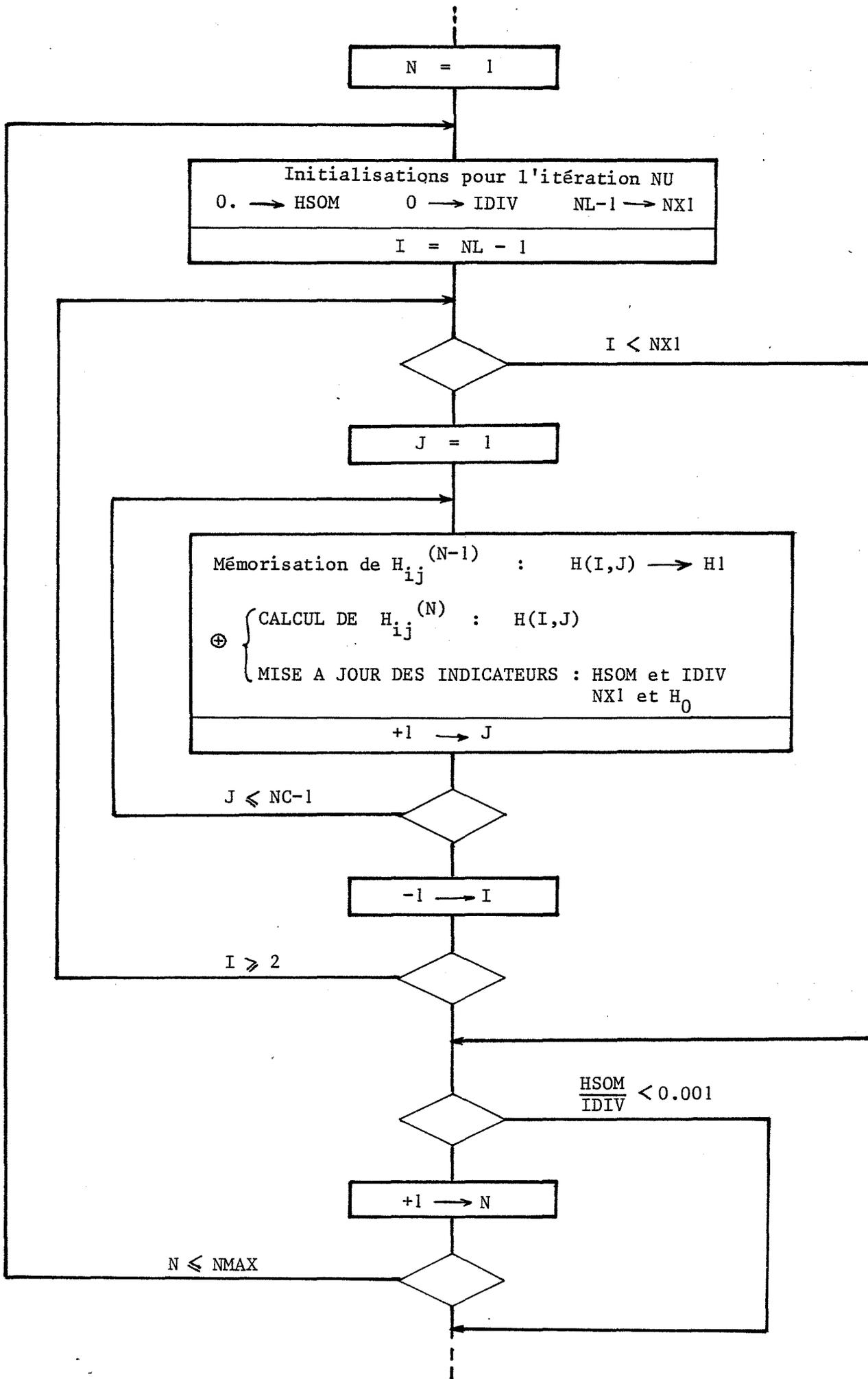


FIGURE 4-15 : SOUS-PROGRAMME MODEE

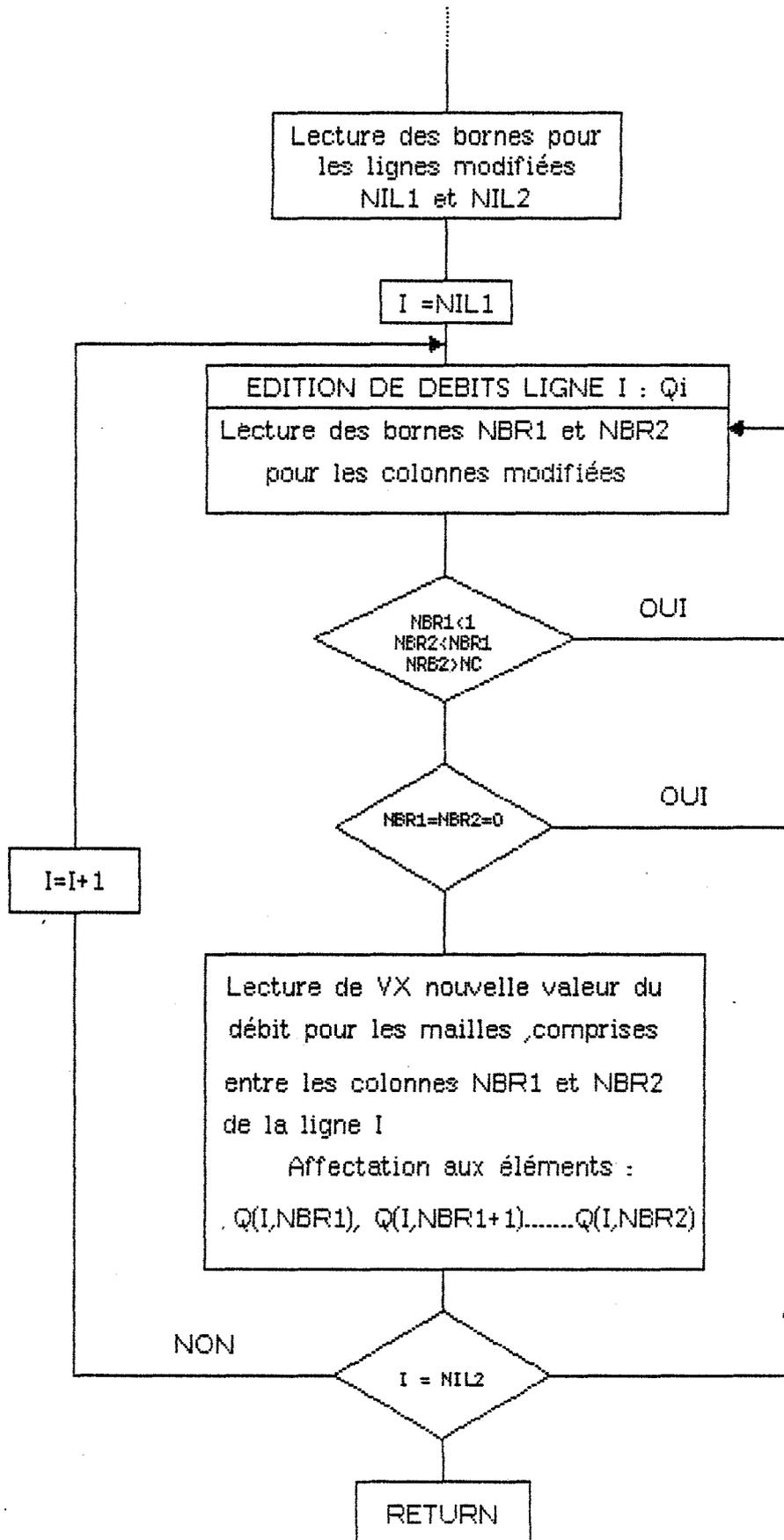
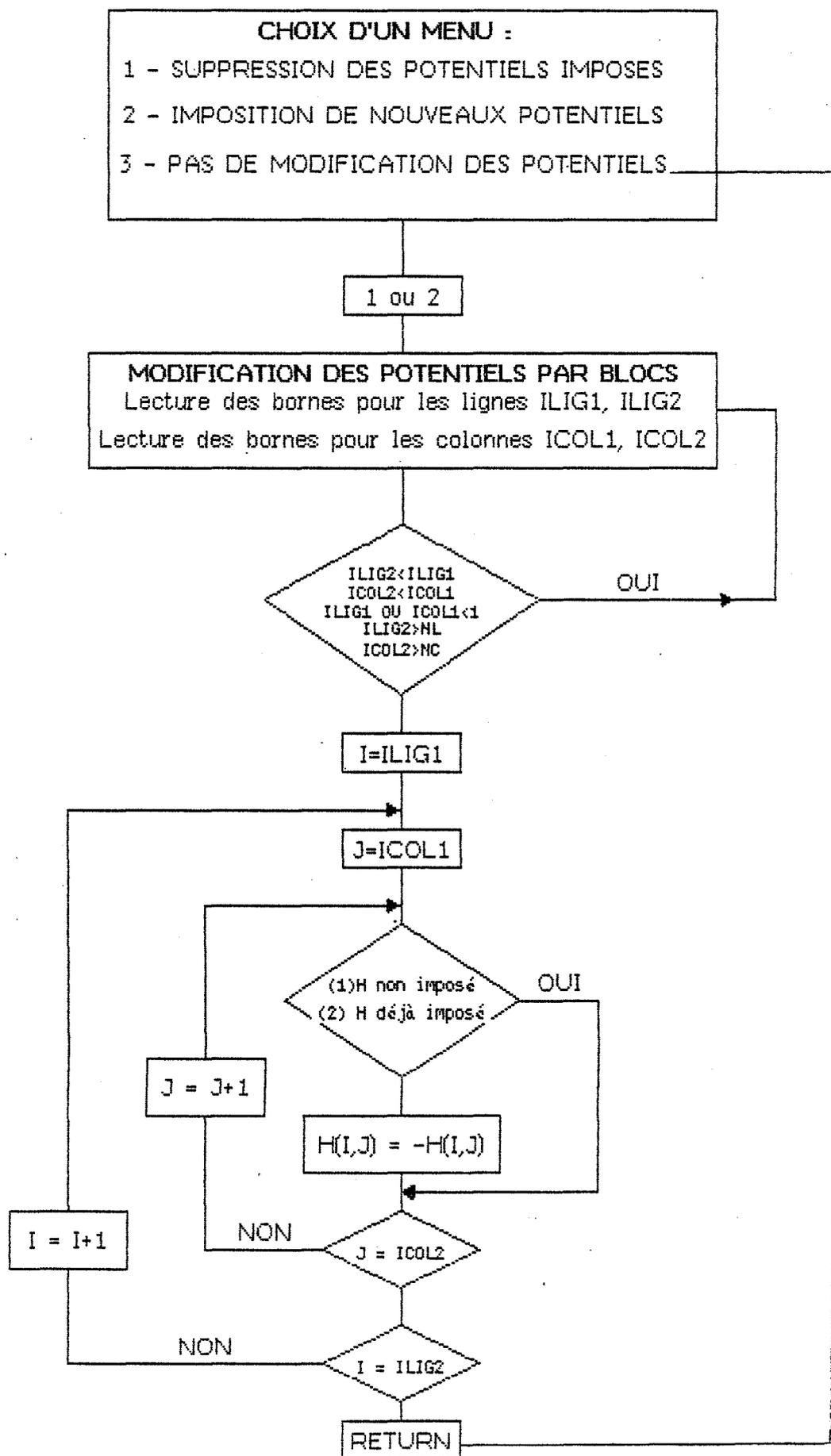


FIGURE 4-16 : SOUS-PROGRAMME IMPOT



\*"TRANSIT"

L'organigramme du programme "TRANSIT" est semblable à celui décrit précédemment (programme "PERM"), à la seule différence qu'il s'y ajoute une boucle correspondant aux différents pas de temps (figure n°4-17).

Pour le calcul en régime transitoire de la répartition des potentiels, il est nécessaire de connaître les coefficients d'emménagement des différents noeuds du maillage (tableau S(NL,NC)), ainsi que d'introduire les paramètres de simulation supplémentaires correspondant à la durée du pas de temps:

- IPTU = durée du pas de temps unitaire
- IDUR = Nombre de pas de temps unitaires

La méthode de calcul itératif de H choisie, est dite totalement implicite (figure n°4-18).

IV-3 - Utilisation du logiciel - Simulation de l'arrêt de l'exhaure dans les concessions minières des vallées de l'Ondaine et du Lizeron.

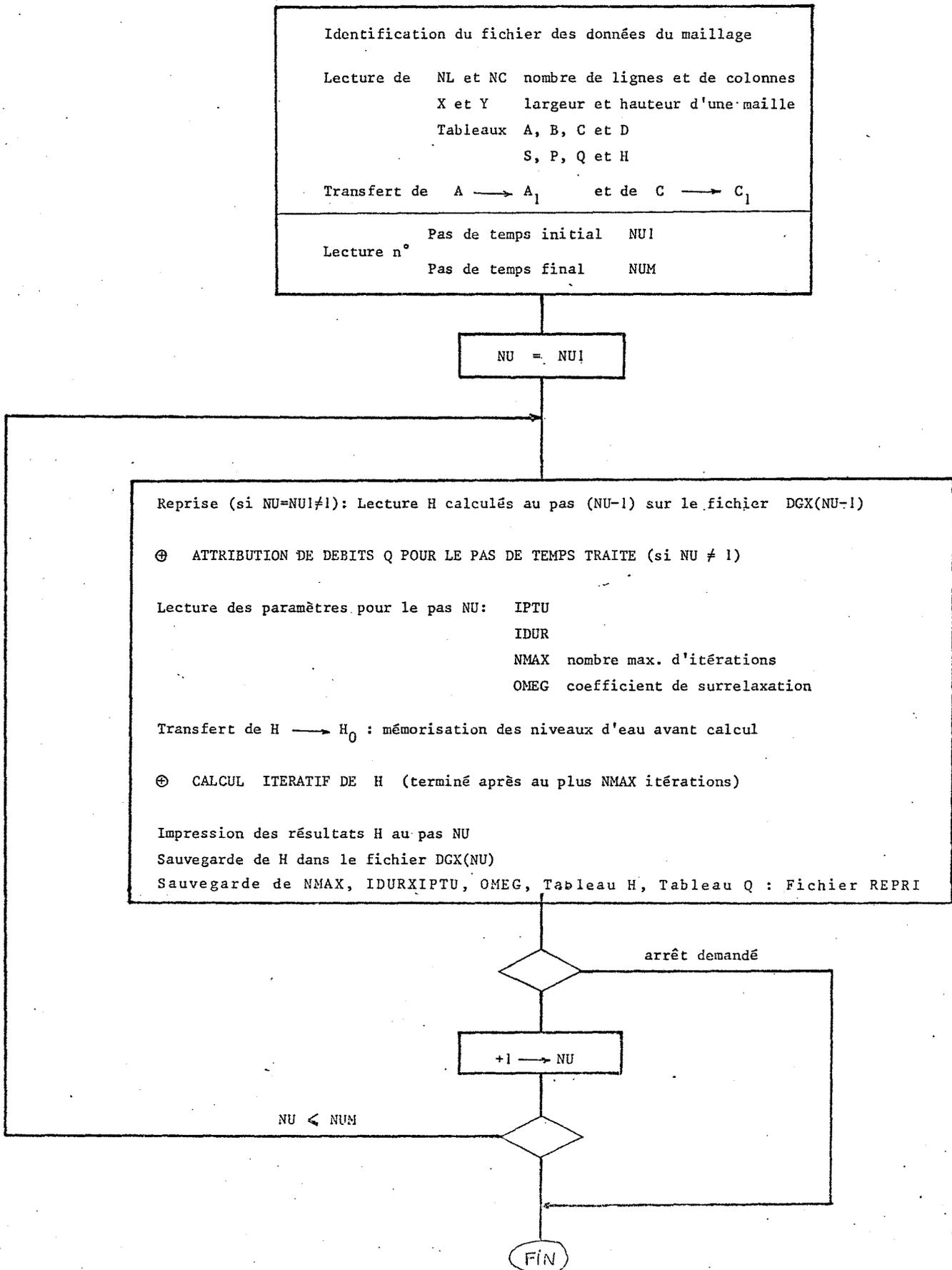
IV-3-1 - Le système étudié - Les données.

Les limites des concessions minières, et leurs différents niveaux d'exploitation ont été localisés sur le maillage à partir de coupes géologiques et de plans d'exploitations qui ont été archivés par les Houillères du Bassin de la Loire. Cependant, le repérage sur un maillage ne peut être précis au point de représenter la réalité compte tenu de la hauteur des mailles (50 m.) bien supérieur à la hauteur des galeries ou des fronts de taille.

Les données disponibles qui concernent les transmissivités (T) et les coefficients d'emménagement (S), dont l'accessibilité a été discutée au §3-1, sont issues de la courbe de remontée du niveau d'eau relevée dans la concession de Roche-la-Molière et d'essais par pompage effectués dans les terrains superficiels à l'aide de piézomètres. Rappelons que seuls des ordres de grandeur de ces caractéristiques ont été déterminés.

Les valeurs de la perméabilité des terrains de la concession ont donc été initialisées à  $5.10^{-4}$  m/s. Certains auteurs (P.R DAVIS - W.C. WALTON - 1982) signalent pour les grès et schistes des terrains houillers, des valeurs de

FIGURE N°4-17  
**ALGORITHME GENERAL**  
**PROGRAMME TRANSIT**



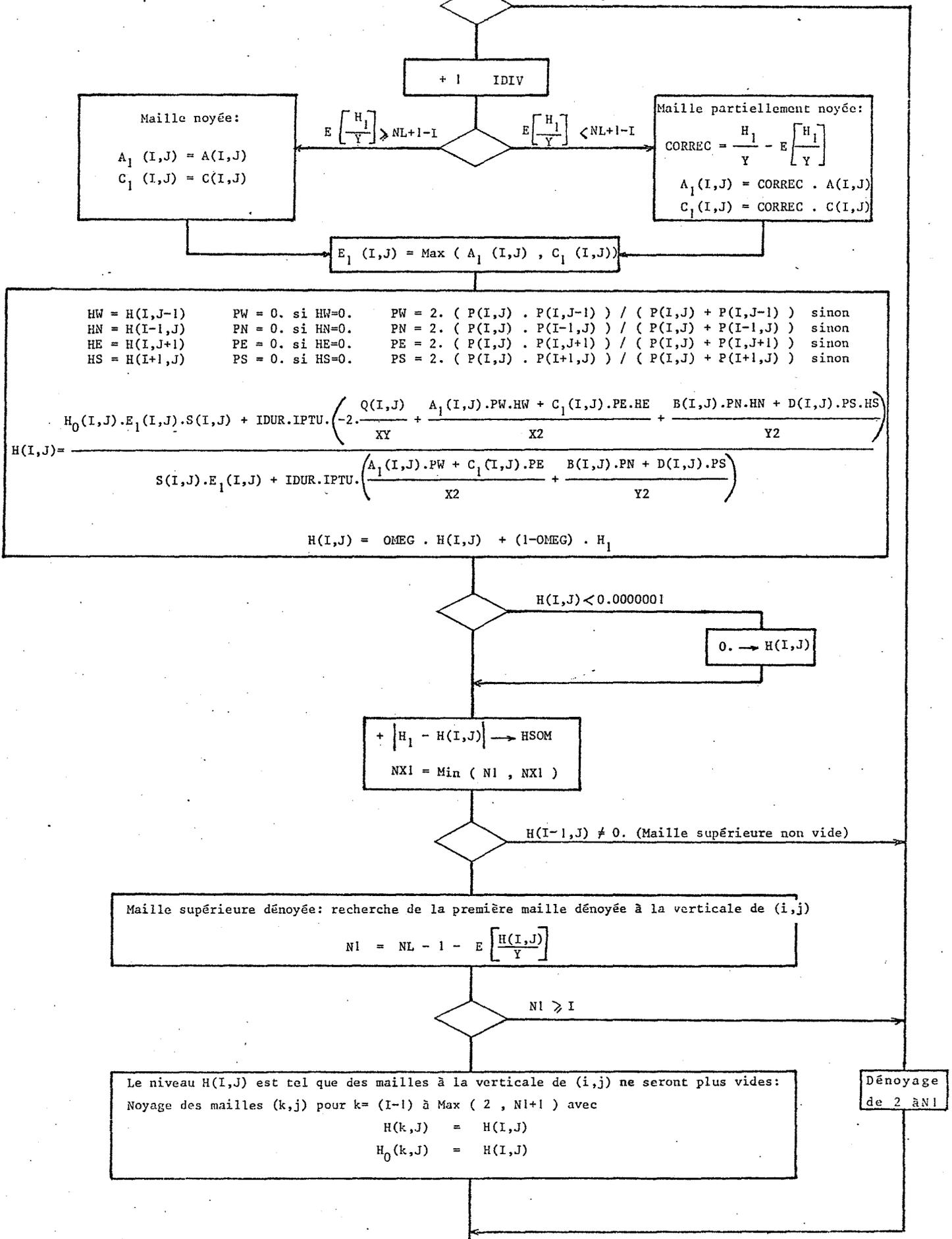
$H_1 \approx 0$ . (Maille dénoyée)

FIGURE N°4-18

PROCEDURE DE CALCUL DE H<sub>ij</sub> MISE A JOUR DES INDICATEURS DE H<sub>ij</sub>

PROGRAMME "TRANSIT"

$P$  voisines de  $10^{-8}$  m/s. Ces valeurs seront affectées aux terrains houillers "hors-concessions". Les pompages intéressant la zone étudiée sont ceux du puits du Marais de la concession de Roche-la-Molière ( $3000 \text{ m}^3/\text{j}$ ), celui du puits des Combes de la concession de la Béraudière ( $1000 \text{ m}^3/\text{j}$ ), celui du puits Pigeot pour Montrambert ( $1700 \text{ m}^3/\text{j}$ ) et celui du puits de la Chana pour Varenne ( $3500 \text{ m}^3/\text{j}$ ). La valeur de ces débits est corrigée pour les calculs en fonction de la surface de la concession concernée par la coupe.

Les valeurs des débits d'infiltration sont réparties sur toutes les mailles de chaque concession, et sont considérées comme nulles sur les terrains non exploités (2° partie, bilan en eau).

Les valeurs des perméabilités des galeries de communication entre les différentes concessions sont théoriquement infinies. Cependant, comme ces galeries sont représentées par des mailles de 50 mètres de haut et 1000 mètres de large, les perméabilités de ces mailles ont été estimées en fonction de la taille de la galerie et des terrains houillers non exploités qui les limitent et qui sont atteints par l'influence des travaux de creusement.

Le traitement de ces données permet de calculer la valeur piézométrique  $H$  sur chaque noeud du maillage, en régime permanent donc à l'état d'équilibre du système. La situation avant arrêt de l'exhaure peut être considérée, à une échelle de temps supérieure à la journée, comme un régime permanent. En effet le calcul du bilan en eau a établi que la somme des débits pompés avant arrêt de l'exhaure était équivalente à celle des débits infiltrés (figure n°4-5).

Les valeurs des coefficients d'emménagement, données indispensables pour le calcul en régime transitoire, ont été fixées à 0.03 pour les mailles correspondant aux niveaux non exploités à l'intérieur d'une concession et à 0.07 pour ceux qui le sont. Pour les terrains hors concessions ce coefficient a été fixé à 0.0001.

Toutes ces valeurs ont été affinées grâce à des simulations effectuées sur la seule concession de Roche-la-Molière : le modèle a été utilisé pour reconstituer la remontée du niveau de l'eau dans la concession suite à l'arrêt de l'exhaure en 1977.

Le calage progressif de la courbe de remontée simulée sur la

courbe réelle, a permis de mieux connaître les paramètres hydrodynamiques du milieu en fonction de l'intensité de l'exploitation.

#### IV-3-2 - Calage du modèle sur la concession de Roche-la-Molière.

##### IV-3-2-1 - Présentation

Le choix s'est porté sur la concession de Roche-la-Molière qui est la seule sur laquelle nous possédons un suivi régulier et de longue durée pour une remontée du niveau d'eau (arrêt de l'exhaure en 1977, reprise en 1981).

D'autre part, elle est sans doute l'une des concessions les mieux connues sur le système étudié. Elle présente, en effet, une structure géologique relativement simple correspondant à un panneau de pendage N-NE à 30° environ, et très peu morcelé par des failles.

La concession est limitée au sud par la faille de Dourdel-Montsalson et elle se situe presque en limite des terrains houillers au nord.

L'exploitation a fait l'objet d'une étude d'archives approfondie en 1977 avant l'arrêt de l'exhaure : tous les étages de travaux sont à peu près connus, à l'exception des travaux très anciens sans doute tous situés près de la surface.

La seule communication qui existe encore entre cette concession et le reste du système est le travers-banc Bouchetière (cote 450 NGF), dont on sait à l'heure actuelle, qu'il est très probablement colmaté, ce qui justifie une modélisation indépendante pour la concession (figure n°4-19).

Depuis le début de l'exhaure et jusqu'en 1977, le recensement historique des données est difficile. L'évolution des niveaux piézométriques et celle des perméabilités sont mal connues, ce qui rend tout calage en régime transitoire à la descente du niveau d'eau impossible.

De plus, rappelons que dans une exploitation minière l'eau est exhaurée à partir de bassins où elle a été préalablement collectée, il ne s'agit donc pas de pompages en milieu saturé. Le calage du modèle doit donc s'effectuer pour la remontée du niveau de l'eau après arrêt des pompages, à partir d'une situation piézométrique stable connue et réaliste.

Dans une première phase de simulation, la situation recherchée

sera celle d'un régime permanent stable établi avant l'arrêt des pompages dans la concession.

Le niveau piézométrique dans les concessions étant alors connu, les valeurs seront imposées dans le modèle; les débits de pompage et d'infiltration qui s'équilibrent à peu près le sont aussi.

Les niveaux piézométriques étant très bas, on ne peut a priori parler de calage en régime permanent si ce n'est celui des valeurs propres aux terrains de base de la concession.

Le but de la simulation hydrodynamique en régime permanent est en fait, d'obtenir une situation initiale lorsque le système est à l'équilibre. A partir de celle-ci on calera le modèle en régime transitoire après l'arrêt des pompages, arrêt qui constitue la perturbation principale apportée au système.

#### IV-3-2-2 - Choix du pas de temps

La durée totale de la simulation hydrodynamique est d'environ 4 ans et demi (temps simulé), répartis sur 58 pas de temps d'un mois.

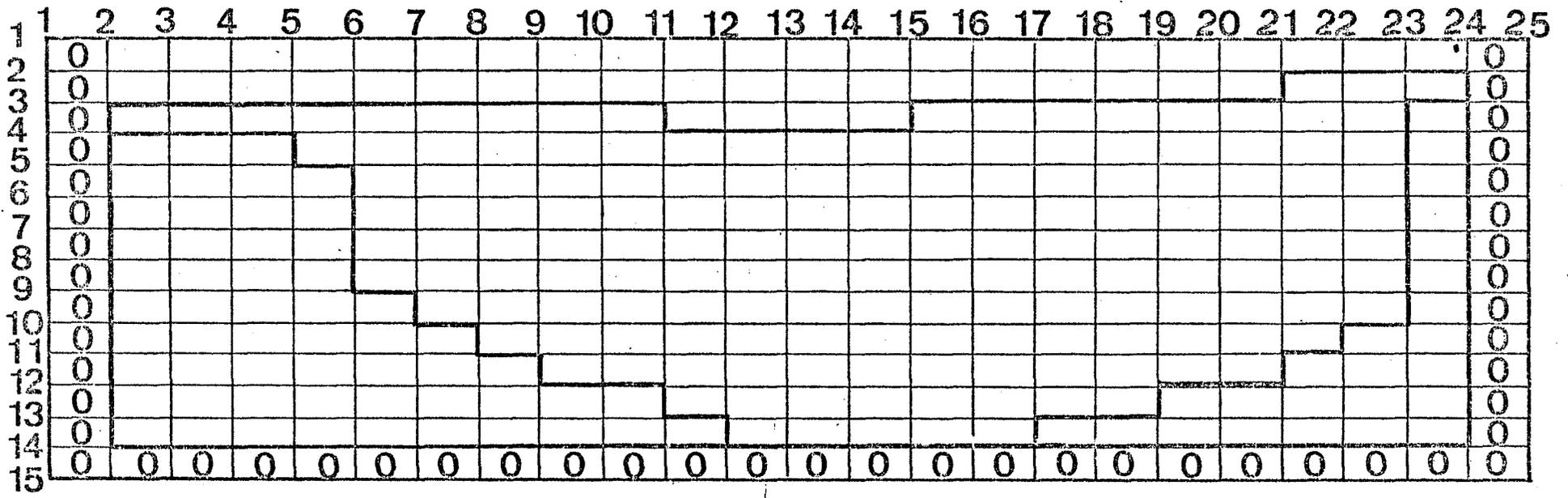
La durée relativement brève des pas de temps permet de vérifier la cohérence des niveaux piézométriques obtenus par simulation, avec les mesures effectuées sur le puits du Marais et le puits Grüner de la concession de Roche-la-Molière, pour des périodes de temps équivalentes après arrêt de l'exhaure.

L'interprétation des résultats s'effectue en comparant la valeur de la piézométrie calculée, qui est à peu près identique pour tout le modèle (à  $\pm 0.2m$ ), à celle de la courbe expérimentale pour le pas de temps considéré.

Cette courbe a été dressée à partir de mesures ponctuelles relevées simultanément pendant 1 an sur les deux puits de la concession, éloignés de 1 km environ (les mesures étant identiques au mètre près sur les deux puits, on peut penser que le niveau est le même pour toute la concession).

Le choix de la durée du pas de temps a aussi été fait pour éviter un trop grand nombre de simulations : un pas de temps plus court aurait exigé un nombre de simulations beaucoup trop important, et le calage n'aurait pas pu être meilleur compte tenu de la hauteur des mailles (50m.).

FIGURE N°4-19



X = 100 m.  
Z = 50 m.

MAILLAGE DE DISCRETISATION DE LA CONCESSION DE ROCHE LA MOLIERE.

PAS DE TEMPS	LIGNE	PIEZOMETRIE		ECART	
		CALCULEE	REELLE	ABSOLU	RELATIF
1	13	37.7	40.0	-2.3	-6.2
2	13	69.6	68.0	+1.6	+2.2
3	12	97.8	100.0	-2.2	-2.2
4	11	120.1	130.0	-9.9	-8.2
5	11	139.1	142.0	-2.9	-2.1
6	11	154.0	147.0	+7.0	+4.5
7	10	166.0	152.0	+14.0	+8.4
8	10	176.9	170	+6.9	+3.9
9	10	186.4	185.0	+1.4	+0.8
10	10	195.2	196.0	-0.8	-0.4
11	9	203.3	200.0	+3.3	+1.6
12	9	211.2	217.0	-5.8	-2.7
13	9	218.2	224.0	-5.8	-2.6
14	9	224.8	228.0	-3.2	-1.4
15	9	231.2	235.0	-3.8	-1.6
16	9	237.1	240.0	-2.9	-1.2
17	9	242.8	244.0	-1.2	-0.5
18	8	248.3	249.0	-0.6	-0.2
19	8	253.8	250.0	+3.8	+1.5
20	8	259.2	252.0	+7.2	+2.7
21	8	264.4	257.0	+7.4	+2.8
22	8	269.4	259.0	+10.4	+3.8
23	8	274.0	263.0	+11.0	+4.0
24	8	278.5	268.0	+10.5	+3.7
25	8	282.8	280.0	+2.8	+1.0
26	8	287.1	283.0	+4.1	+1.4
27	8	291.1	289.0	+2.3	+0.8
28	7	295.4	293.0	+2.4	+0.8
29	7	299.6	300.0	-0.4	-0.1
30	7	303.8	305.0	-1.2	-0.4
31	7	307.9	310.0	-2.2	-0.7
32	7	312.0	317.0	-5.0	-1.6
33	7	316.1	321.5	-5.0	-1.6
34	7	320.2	329.0	-8.8	-2.7
35	7	324.2	332.0	-7.8	-2.4
36	7	328.3	335.0	-6.7	-2.0
37	7	332.4	338.0	-5.6	-1.7
38	7	336.4	341.0	-4.6	-1.4
39	7	340.4	342.0	-1.2	-0.5
40	6	345.2	347.0	-1.3	-0.5
41	6	349.9	351.0	-1.1	-0.3
42	6	354.7	359.0	-4.3	-1.2
43	6	359.4	365.0	-5.6	-1.5
44	6	364.2	374.0	-9.9	-2.6
45	6	369.0	380.0	-11.0	-2.9
46	6	373.6	385.0	-11.4	-3.0
47	6	378.3	390.0	-11.7	-3.1
48	6	383.0	397.0	-14.0	-3.6
49	6	387.7	404.0	-16.3	-4.2
50	6	392.4	409.0	-16.6	-4.2
51	5	397.1	413.0	-15.9	-4.0
52	5	401.8	416.0	-14.2	-3.5
53	5	406.5	418.5	-12.0	-2.9
54	5	411.0	421.0	-10.0	-2.4
55	5	415.8	426	-10.2	-2.4
56	5	420.5			
57	5	425.1			
58	5	488.2			

TABLEAU N°4-20

#### IV-3-2-3 - Résultats

Les résultats définitifs sont récapitulés dans le tableau n°4-20.

Au total environ 150 simulations ont été nécessaires pour obtenir un calage du modèle, calage qui d'ailleurs n'est pas parfait et dont nous allons examiner les résultats.

Les périodes, ou les niveaux, qui ont été les plus difficiles à calculer et à caler sont répertoriées sur le tableau suivant (les périodes correspondant au noyage d'une ligne de mailles supplémentaire sont repérées par une croix) :

Pas de temps n° mois	cote (m)	changement de maille
6-7	147 - 152	X
23-24	263 - 268	
28	293	X
30	305	
39-40	342 - 347	X
42	359	
45	380	
49-50	404 - 409	X

Certaines de ces difficultés ont pu être éliminées, d'autres restent non résolues.

L'allure des courbes des variations de H calculé et de H réel en fonction du temps est dans l'ensemble, c'est-à-dire à une échelle de temps supérieure au mois, à peu près identique (figure n°4-21).

#### IV-3-2-4 - Observations

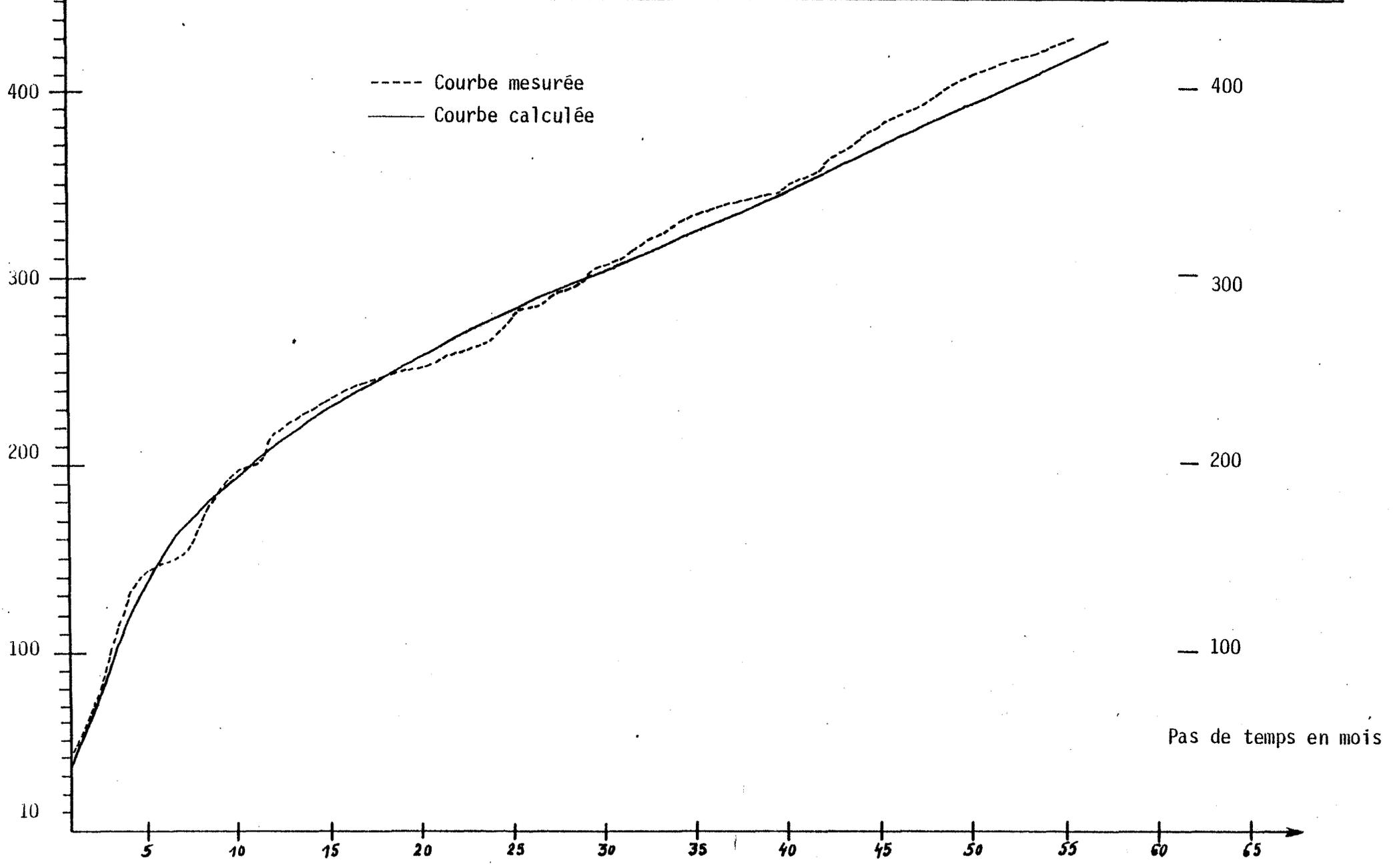
Une analyse plus détaillée de ces courbes peut nous aider à déterminer si les facteurs provoquant les écarts observés sont liés à un manque de connaissance du terrain ou bien à des problèmes algorithmiques.

Il nous a semblé utile, pour cette raison, de relever pour chaque

Hauteurs piézométriques  
en mètres

FIGURE N° 4-21

COURBES DE REMONTEE MESUREE ET SIMULEE DANS LA DIVISION DE ROCHE LA MOLIERE



pas de temps : la piézométrie calculée (compte tenu du décalage de départ consécutif à l'initialisation à 60 m des premières mailles), la piézométrie réellement mesurée, l'écart absolu et relatif, la valeur utilisée pour le coefficient de surrelaxation et le nombre d'itérations effectuées à chaque pas de temps.

On définira:(figure n°4-22)

L'écart absolu  $EA = H_{\text{simulé}} - H_{\text{réel}}$

L'écart relatif  $ER = \frac{H_{\text{simulé}} - H_{\text{réel}}}{H_{\text{simulé}}}$

\* Calage:

La figure n°4-22 montre que le calage progressif du modèle s'est effectué en ajustant les caractéristiques hydrauliques du milieu (T et S) ainsi que sa géométrie aux pas de temps pour lesquels une rangée de mailles supplémentaires était noyée. Les écarts entre les courbes calculées et mesurées sont alors minimes. Le calage du modèle s'est donc effectué en milieu saturé (la seule exception à cette règle concerne le pas de temps 51 pour lequel le niveau d'eau devait atteindre la cote 413 m).

Les écarts relatifs en pourcentage entre les deux courbes sont compris entre -8.2% et +8.4%, maxima atteints pour les pas de temps n° 4 et n° 8.

L'extrémité des courbes, pour laquelle le calage est le plus difficile, révèle des écarts relatifs restant en deçà de ces valeurs étant donné les hauteurs d'eau mises en jeu (4% au plus).

L'écart relatif moyen est de -7.8% environ. C'est un paramètre intéressant puisque, d'autres modélistes s'y réfèrent : des écarts du même ordre de grandeur ont été signalés pour des modélisations de systèmes miniers de dimensions inférieures (+5.8% A.S.OWILI- EGER 1975) et pour des pas de temps également d'un mois.

Si cet indice nous conduit à considérer cette modélisation du milieu minier satisfaisante, nous n'en devons pas moins essayer d'expliquer les difficultés à restituer les irrégularités et ruptures de pente de la courbe expérimentale.

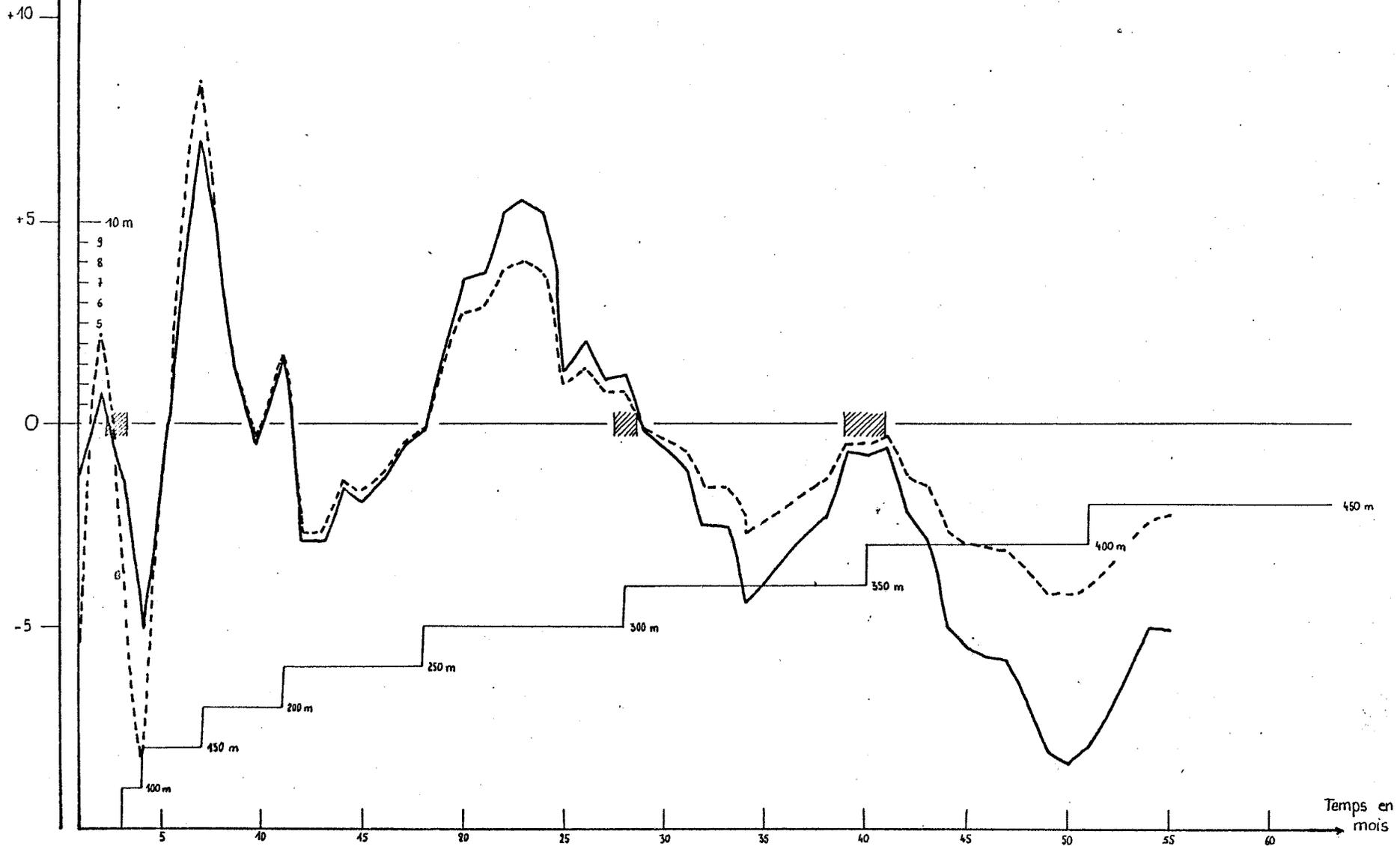
ER en %

EA en m

### ECART ABSOLU ET ECART RELATIF ENTRE LES COURBES REELLES

### ET SIMULEES POUR LA CONCESSION DE ROCHE-LA-MOLIERE

--- ECART RELATIF ER  
— ECART ABSOLU EA



- Avant le pas de temps n° 23:

Les irrégularités de la courbe réelle ne peuvent être restituées, la dimension des mailles ne permettant pas une modélisation correcte des zones de travaux. A ce niveau, une amélioration de l'opération pourrait être envisagée en utilisant un modèle à mailles variables qui serait capable de prendre en compte les données associées aux zones de travaux à condition qu'elles soient disponibles.

- Après le pas de temps n° 23:

La courbe tracée à partir des valeurs piézométriques calculées par simulation est relativement linéaire. Elle admet cependant un point d'inflexion aux pas de temps n° 40-41 c'est-à-dire à la cote 341-351 à partir de laquelle la pente se redresse. Ce redressement de la pente est beaucoup plus marqué sur la courbe mesurée et on peut penser qu'il est significatif de caractéristiques hydrauliques des terrains (T et S) plus faibles.

Le niveau d'eau atteint effectivement des terrains supérieurs à ceux de la cote 330 au-delà de laquelle l'intensité d'exploitation diminue. Les travaux situés à de telles profondeurs sont d'autre part plus anciens que les travaux plus profonds. Ils sont donc en général plus morcelés, et ont été remblayés ou emboués après exploitation, ce qui explique la diminution des paramètres hydrauliques en comparaison avec les travaux plus récents et plus profonds qui habituellement sont foudroyés.

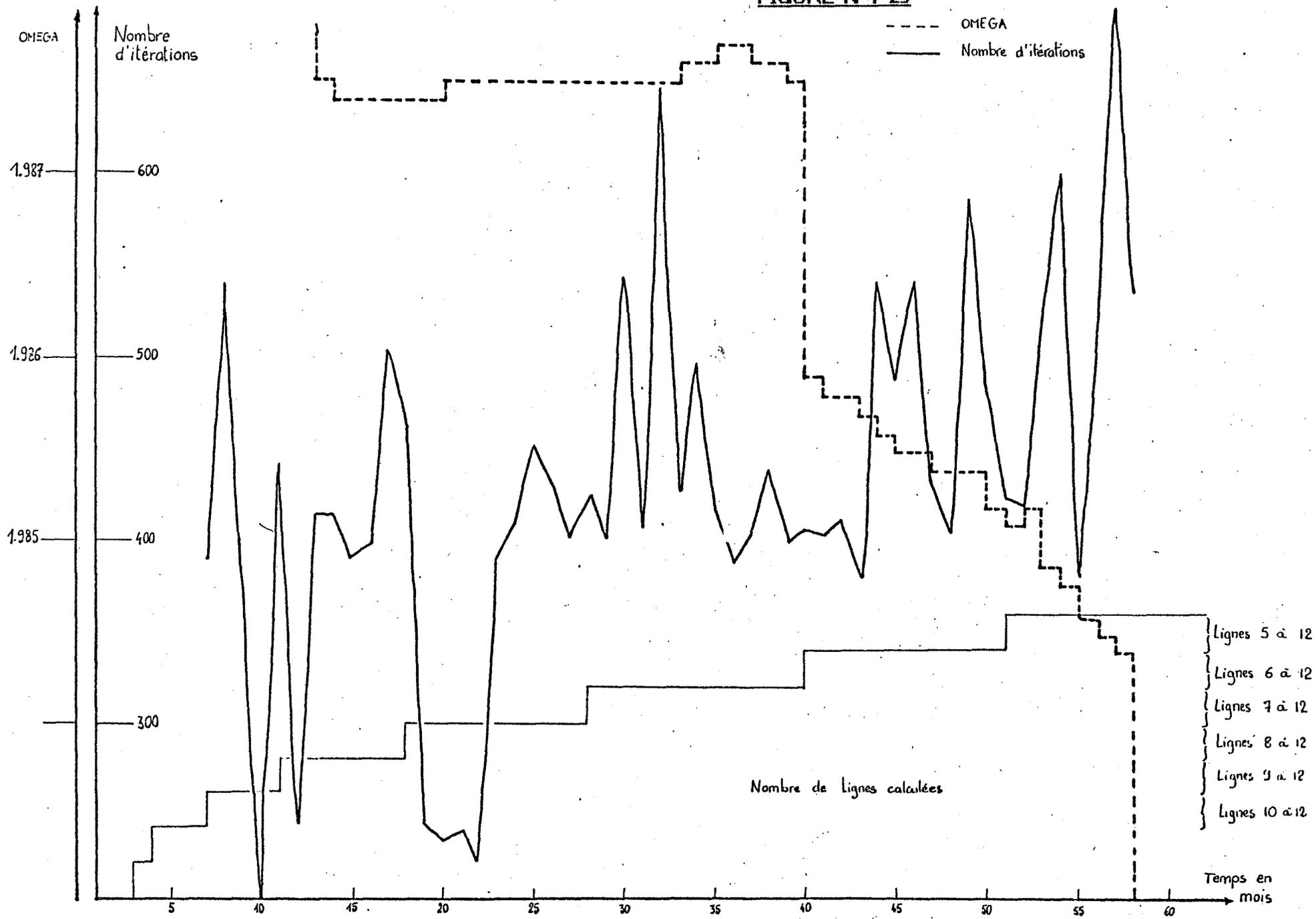
Un meilleur calage a pu être obtenu pour cette dernière partie de la courbe, en augmentant les débits d'injection pour les mois de novembre 1980 à février 1981 qui correspondent, selon les données météorologiques, à une période de pluviométrie supérieure de 20% à la moyenne connue.

#### \* Problèmes de convergence

Le report graphique des valeurs de OMEGA (coefficient de surrelaxation) utilisées, et des itérations nécessaires au calcul de chaque pas de temps, constitue une illustration des difficultés de calage soulevées au cours de la simulation.

La figure n°4-23 montre en particulier le procédé d'amélioration de OMEGA, totalement empirique, qui a été utilisé pour obtenir la convergence des

FIGURE N°4-23



OPTIMISATION DE OMEGA

calculs dans un délai d'itérations raisonnable et compatible avec l'exécution de 58 pas de temps.

En effet, la valeur de OMEGA, non seulement difficile à ajuster au départ, est rarement constante, ce qui semble normal, compte tenu du fait que la taille de la matrice de calcul évolue en cours de simulation hydrodynamique (phénomènes de noyage/dénoyage). Toutefois, les courbes présentées sont symptomatiques de l'instabilité de comportement du système en réponse aux variations de OMEGA.

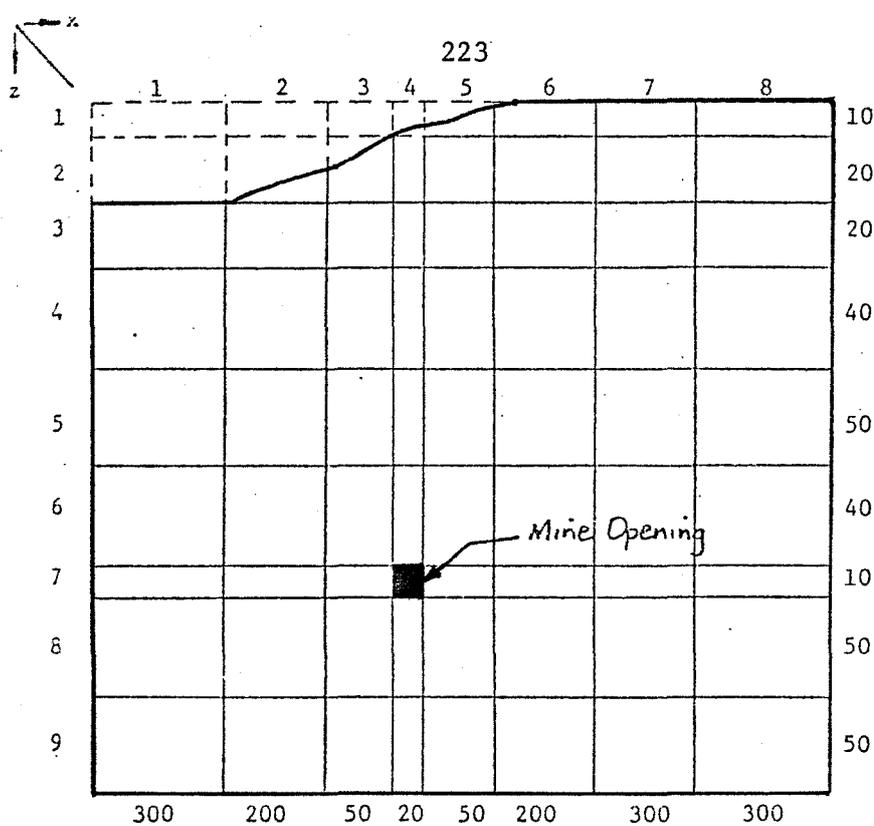
Les valeurs de OMEGA utilisées pour les calculs jusqu'à la ligne 6 du maillage ne varient que très faiblement (elles sont comprises entre 1.9874 et 1.9878), mais le nombre des itérations de calcul est très sensible à ces variations. De faibles augmentations de OMEGA (à la cinquième décimale près) provoquent en général une diminution du nombre des itérations nécessaires pour atteindre la précision demandée, constante et égale à  $8.10^{-4}$  pour chaque pas de temps de même durée (la précision des calculs a volontairement été choisie très grande, dans la mesure où les résultats de cette simulation devaient être utilisés ultérieurement pour prévoir les caractéristiques des autres concessions, de plus il s'agissait là, avant tout, de tester le modèle).

Lorsque les calculs s'étendent au-delà de la sixième ligne du maillage, on observe qu'une nette diminution de OMEGA est nécessaire pour maintenir le nombre d'itérations nécessaires à la convergence au dessous de 700 : OMEGA passe des valeurs 1.987 jusqu'aux valeurs 1.979 pour se rapprocher de la valeur de OMEGA (1.727) calculée pour le maillage total. Cette tendance serait évidemment à confirmer en poursuivant la simulation.

Nous ne pouvons, ici nous permettre d'interpréter ces variations de oméga, mais il nous a semblé intéressant de livrer ces résultats à l'attention de personnes plus compétentes, une analyse plus détaillée, en collaboration avec des mathématiciens, permettrait peut être d'élucider le problème qui se pose ici.

Ces problèmes de convergence sont également abordés par A.S.C. OWILI EGER en 1975, dans ses travaux de modélisation en milieu minier (figure n°4-25): optimisation du rapport  $x/z$  pour faciliter la convergence.

La convergence des calculs est optimisée par le choix de la taille des mailles (dans son cas de taille variable), qui consiste à minimiser pour chaque élément le rapport  $x/z$ ,  $x$  et  $z$  étant respectivement la dimension des mailles selon les axes horizontaux et verticaux (figure n°4-25).



Simulation de l'exhaure minière (Pennsylvanie USA) : A.S.C OWILI EGER

La hauteur des mailles augmente vers le bas du maillage

Dans notre cas, ce rapport constant et égal à deux, est élevé et il explique peut être le nombre d'itérations nécessaire pour qu'il y ait convergence. Mais les contraintes géométriques qui nous sont imposées rendent impossibles l'augmentation de la hauteur des mailles, de même la diminution de leur longueur augmenterait la complexité du maillage et par conséquent alourdirait l'introduction des données.

Conclusions

L'outil de simulation mis au point a donc été ajusté et testé jusqu'à la cote 428 m de la concession minière de Roche-la-Molière.

Sachant que la réponse du modèle est à 8% près celle du système réel, on peut établir que la remontée du niveau d'eau dans cette concession évolue correctement jusqu'à la cote 428 m à partir de laquelle les pompages dans le puits du marais ont repris ( $310 \text{ m}^3/\text{j}$  de janvier 1982 à décembre 1983).

Il s'agit de pompages classiques à rabattement constant effectués à l'aide d'une pompe immergée, auxquels les lois de filtration (loi de Darcy et équation de diffusivité) sont applicables. La simulation de ces pompages en régime permanent confirme le maintien du niveau piézométrique. Cette situation

s'est prolongée jusqu'en janvier 1984, à la suite de quoi, l'exhaure a de nouveau, été arrêté.

IV-3-2-5 - Comparaison entre les paramètres hydrodynamiques obtenus par simulation, et les données concernant le terrain.

Les résultats du calage du modèle sur la concession de Roche-la-Molière, nous permettent de statuer sur les valeurs des caractéristiques hydrauliques et géométriques définitives des terrains de la concession, caractéristiques dont nous vérifierons la cohérence afin de confirmer la validité de l'outil réalisé et calé.

Les valeurs des transmissivités (Figure n°4-26) varient de  $2.10^{-2}$  m/s à  $8.10^{-1}$  m/s. Elles sont maxima entre les cotes 140 et 190 m. Les niveaux qui présentent les perméabilités les plus faibles apparaissent au-dessus de la cote 340 m.

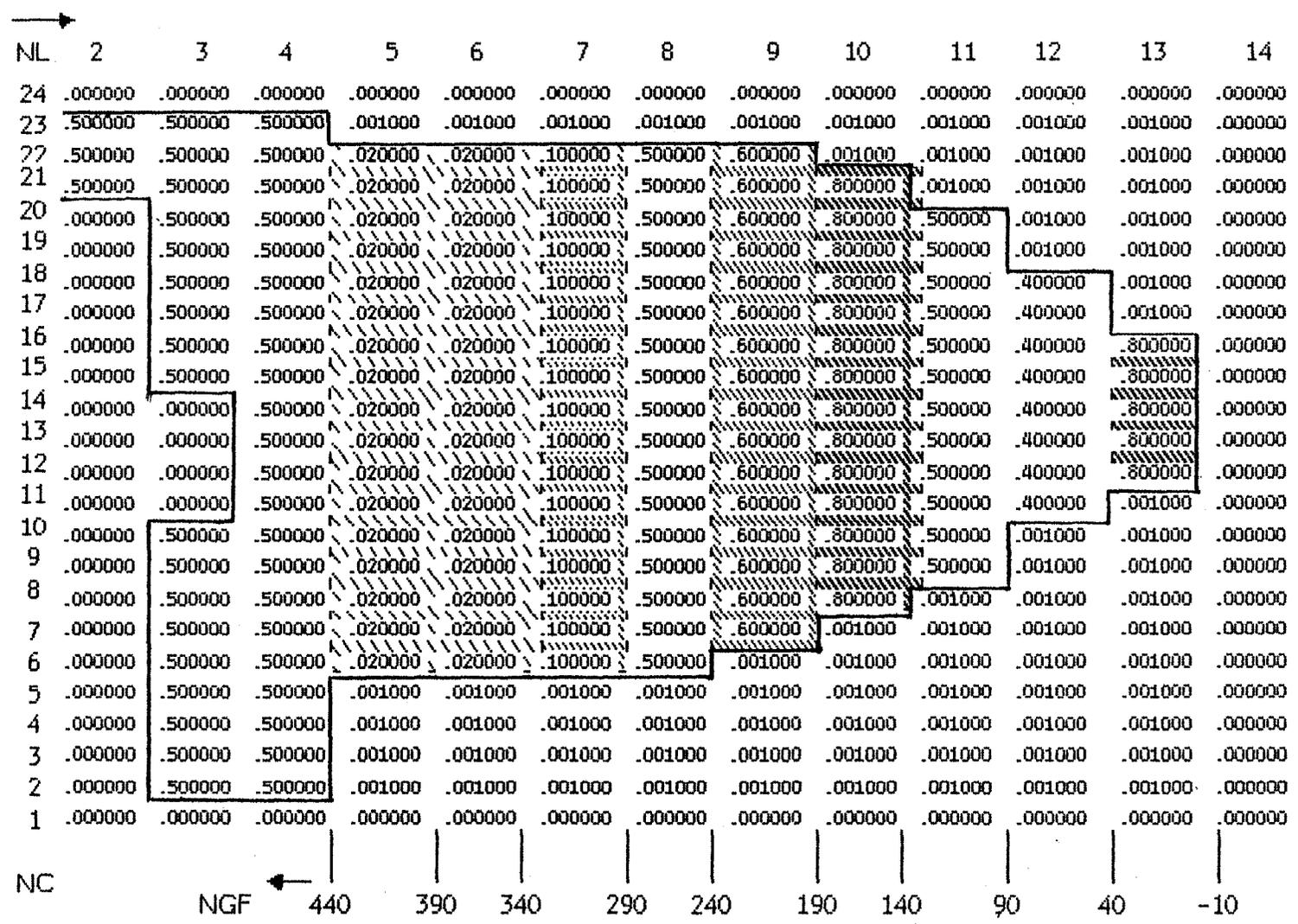
Les valeurs des coefficients d'emmagasinement (Figure n°4-27) se répartissent de manière à peu près identique suivant les différents niveaux de la concession. Elles sont comprises entre 0.3% et 0.7%, c'est pour les niveaux compris entre les cotes 140 et 190 m que les valeurs sont les plus fortes. Les plus faibles appartiennent aux terrains situés au-dessus de la cote 340 m.

La largeur des terrains exploités est constante et d'environ 1700 m de la cote 440 à la cote 240 m. Elle diminue ensuite progressivement pour atteindre 500 m au fond de la concession (-10 à +40 m).

Si ces résultats restent cohérents entre eux, la comparaison de leur position sur le maillage du modèle avec la localisation des travaux souterrains relevés dans les archives de la concession mérite quelques explications.

Les valeurs des paramètres de calage S et P sont évidemment plus précises que les ordres de grandeur qui ont été définis au début de l'étude, mais elles ne correspondent pas exactement à la réalité.

En effet, les zones d'intensité maximum de travaux (Figure n°4-28) aux cotes 220 et 330 m ne possèdent pas les perméabilités et les coefficients d'emmagasinement les plus forts du modèle.



VALEURS DE T CALEES POUR LA CONCESSION DE ROCHE-LA-MOLIERE

FIGURE N°4-26

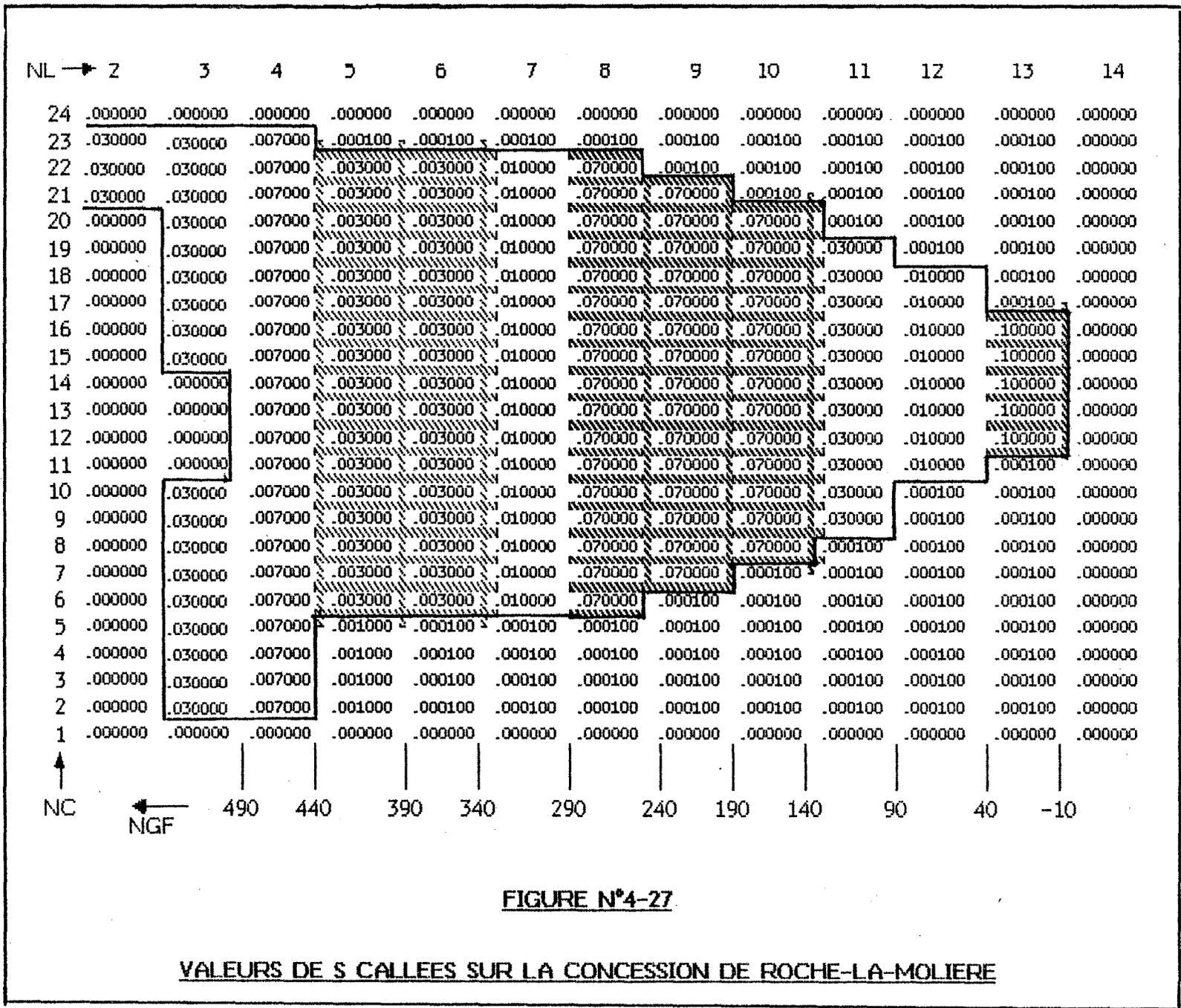


FIGURE N°4-27

VALEURS DE S CALLEES SUR LA CONCESSION DE ROCHE-LA-MOLIERE

Or, malgré l'incertitude des données concernant l'état des travaux, les paliers de la courbe de remontée mesurée, impliquent des valeurs fortes de ces paramètres - surtout pour les niveaux 220 et 330 m.

Cette différence s'explique par le fait que, les valeurs de calage de T et de S sont des valeurs qui prennent en compte l'influence des terrains adjacents à ceux modélisés (la distribution de ces valeurs dans le maillage montre que le pendage des terrains n'est pas pris en compte). Ce sont donc des valeurs "équivalentes" qui seules peuvent permettre le calage du modèle en restituant au mieux, par le calcul, les irrégularités de la courbe expérimentale.

On constate, en effet, que si l'on pondère la grandeur des paramètres S et T, par une valeur inverse à la largeur de concession modélisée (figure n°4-28), la correspondance se fait beaucoup mieux entre les caractéristiques naturelles du terrain et les paramètres de simulation.

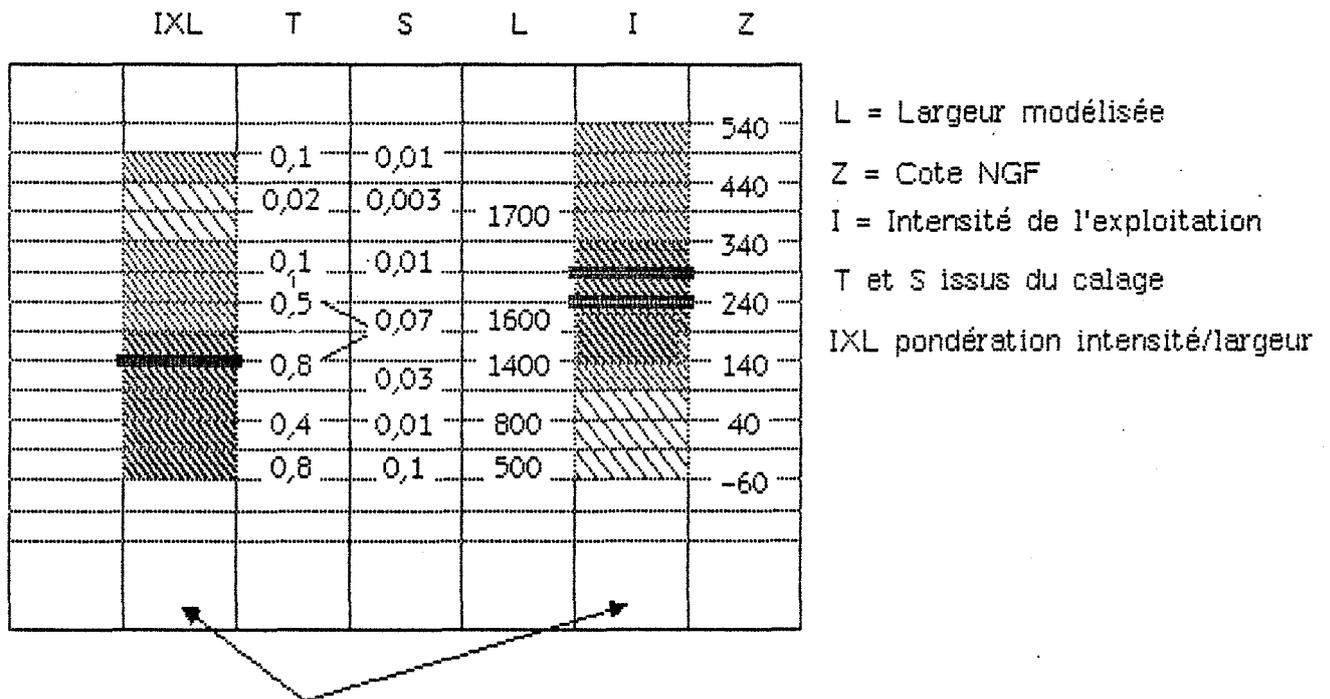
Sans redéfinir ici le concept de modèle, on obtient donc un milieu possédant des caractéristiques équivalentes à celles du milieu minier réel dont le comportement hydraulique est simulé de manière satisfaisante.

Les résultats de cette opération de simulation de la remontée du niveau d'eau dans la division de Roche-la-Molière nous autorisent donc à attribuer les valeurs déterminées pour P et S aux autres divisions minières du système en fonction de leur contexte géologique (nature et pendage des couches), de l'intensité et du mode d'exploitation auxquels elles ont été soumises.

Ce modèle à plus grande échelle a pour but de prévoir dans le temps la remontée du niveau des eaux de mine jusqu'aux zones vulnérables de la topographie.

- REMARQUE:

En ce qui concerne l'évolution du niveau piézométrique de la concession de Roche-la-Molière par simulation de l'arrêt des nouveaux pompages en Janvier 1984, l'acquisition de données complémentaires à ce sujet permet le calage des mailles jusqu'à la cote 440. Au-delà, la prévision du niveau piézométrique sera beaucoup plus aléatoire compte tenu de la présence de vieux travaux très superficiels dont on connaît l'existence sans en connaître la localisation ni l'étendue.



Plus le figuré est sombre, plus les valeurs représentées sont grandes

Remarque : la corrélation se fait très mal entre l'intensité des travaux (I) et les paramètres T et S issus de la simulation, elle se fait par contre beaucoup mieux si l'on pondère l'intensité de l'exploitation par la largeur modélisée (IXL)

### CORRELATION ENTRE L'INTENSITE DES TRAVAUX ET LES PARAMETRES T ET S

**FIGURE N°4-28**

IV-3-3 - Simulation de la remontée du niveau d'eau dans les autres concessions.

IV-3-3-1 - Utilisation des résultats obtenus sur Roche-la-Molière : méthode d'estimation des paramètres pour les autres concessions.

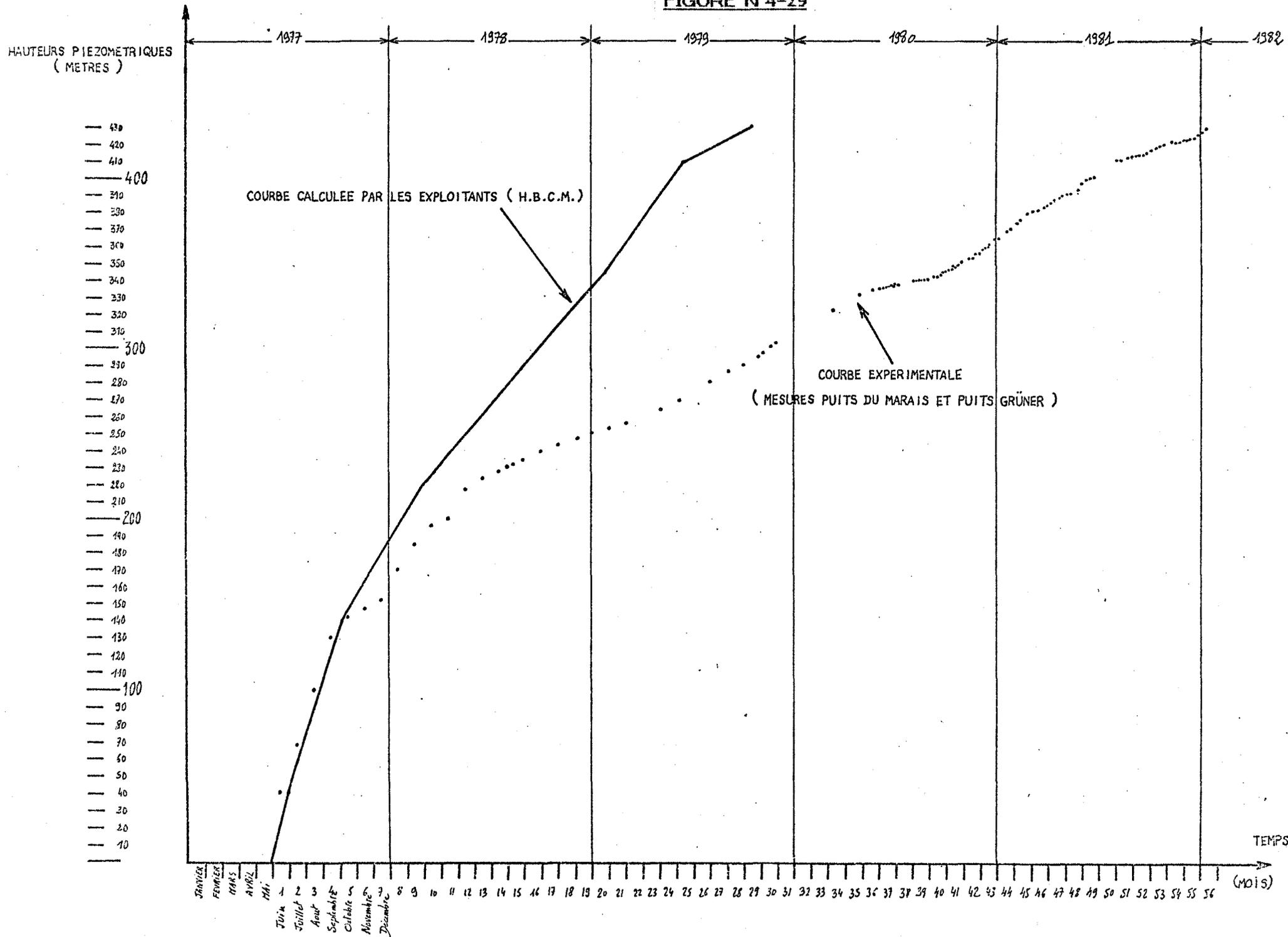
Les corrélations effectuées, pour la division de Roche-la-Molière, entre les valeurs de calage du modèle et le degré d'exploitation des différents niveaux ont permis de déterminer les fourchettes de valeur pour les autres divisions en fonction également de l'intensité des travaux.

Ce paramètre a été établi par consultation des "plans minute" de chaque concession : l'importance des travaux suivant les différents étages de division est ramené à la largeur modélisée de la division et fournit une estimation de l'intensité des travaux, qui permet d'attribuer à chaque étage une perméabilité et un coefficient d'emmagasinement.

Remarque : Une première prévision de la courbe de remontée avait été faite par les houillères à partir de données correspondant au volume de charbon extrait par niveau, pondéré par un coefficient dépendant du type de contrôle de l'arrière taille (12,5% pour le remblayage et 25% pour le foudroyage). Le résultat n'est pas satisfaisant pour corrélérer les données à l'intensité des travaux (figure n°4-29), notamment en ce qui concerne les travaux foudroyés pour lesquels le volume de vides rémanent après abandon des travaux est exactement le même que le volume extrait initialement mais réparti de manière différente sur une plus grande hauteur. Notons cependant que cette méthode de prévision n'aurait nécessité que quelques faibles aménagements pour devenir adéquate (les ruptures de pente sur la courbe prévue sont bien corrélées avec celles de la courbe mesurée). Elle n'a pas été employée au cours de notre étude en raison de l'absence de données relatives à certaines concessions, et du temps nécessaire à la recherche archivistique des données existantes.

Le calage du modèle sur la concession de Roche-la-Molière a permis d'acquérir une connaissance plus fine des paramètres hydrodynamiques des étages exploités ou non exploités dans une même concession. L'utilisation de ces paramètres devra cependant se faire avec beaucoup de prudence compte tenu des approximations liées d'une part au pendage des terrains, d'autre part au mode d'exploitation des étages et à leur ancienneté.

FIGURE N°4-29



La méthode d'estimation des paramètres telle que nous allons la décrire, présente un aspect relativement qualitatif, qu'il nous a été donné d'affiner grâce à un début de remontée des eaux dans les divers concessions après l'arrêt définitif de l'exhaure.

Dans un premier temps, un levé systématique de tous les plans minutes au 1/1000<sup>ème</sup> a été effectué dans les archives des houillères de la Loire. Chaque plan au 1/1000<sup>ème</sup> représente en effet un panneau exploité, et n'existe, généralement qu'en un seul exemplaire parce que la synthèse des travaux pour un étage se fait sur plan au 1/2500<sup>ème</sup>.

Sur chacun de ces plans, la cote la plus basse du panneau et la cote la plus élevée ont été notées, puis reportées sur un graphique (dont l'axe horizontal représente l'altitude) et reliées par un trait (exemple figure n°4-30). Sur ce graphique, chaque trait représente donc la présence d'un panneau d'exploitation entre les deux cotes NGF qui le limitent.

Après avoir défini des intervalles de 20 mètres sur l'axe horizontal, un comptage des traits a été fait sur la verticale, ce qui a permis de dresser un histogramme représentatif de l'importance de l'exploitation pour les différents niveaux (figure n°4-31).

La largeur modélisée de la concession, la structure géologique (pendage des couches, présence de failles etc...), ainsi que la date d'exploitation des panneaux ont ensuite permis d'attribuer, un peu empiriquement, des valeurs de T et S pour chaque concession, à chaque ligne du maillage, en se référant aux paramètres obtenus sur Roche-la-Molière.

Pour la concession de la Béraudière, par exemple, dont l'organigramme est représenté figure n°4-31, les valeurs retenues pour T et S sont les suivantes :

ETAGE	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
S	0.003	0.008	0.050	0.075	0.075	0.055
T	0.02	0.08	0.54	0.80	0.80	0.62

FIGURE N° 4-30

NOMBRE DE PANNEAUX COMPTABILISES PAR INTERVALLE DE VINGT METRES DE HAUTEUR

1 1 2 1 2 1 2 1 2 2 1 2 3 1 5 4 1 6 0 1 6 2 1 6 5 1 6 9 1 7 0 1 6 7 1 6 2 1 6 2 1 4 4 1 3 3 1 2 6 1 2 4 1 2 8 1 3 5 1 3 7 1 5 2 1 5 6 1 5 7 1 5 3 1 5 4 1 5 0 1 4 1 3 6 1 2 0 1 2 2 1 1 6 1

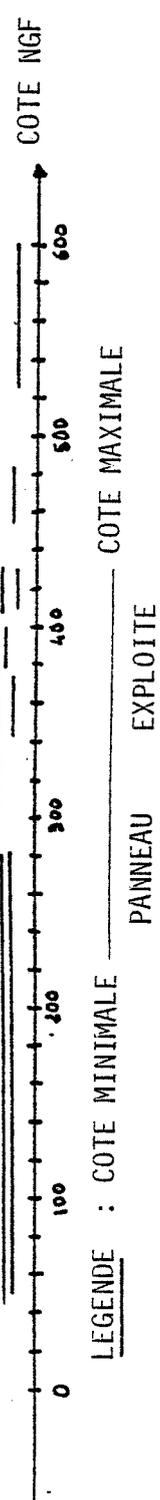
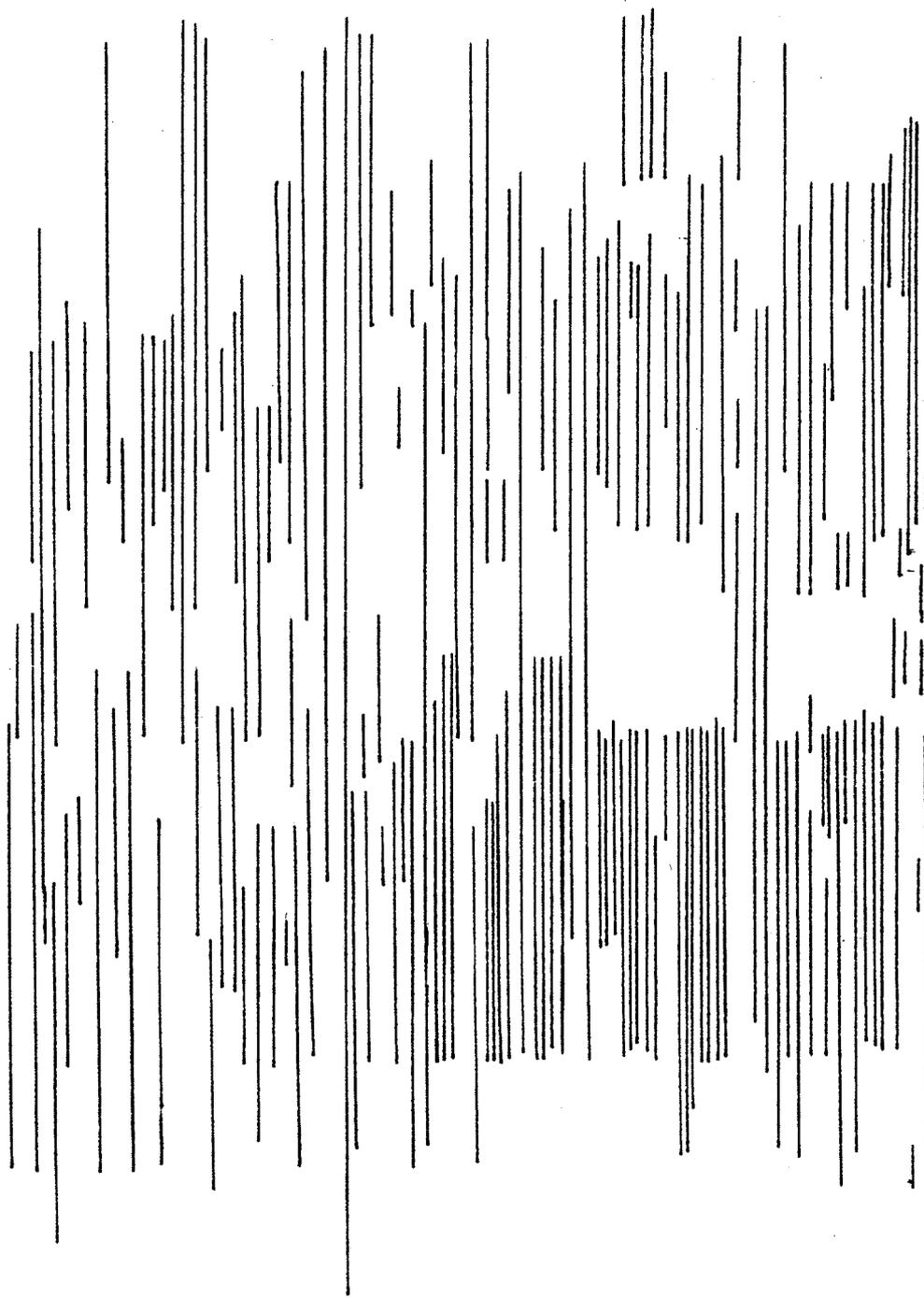
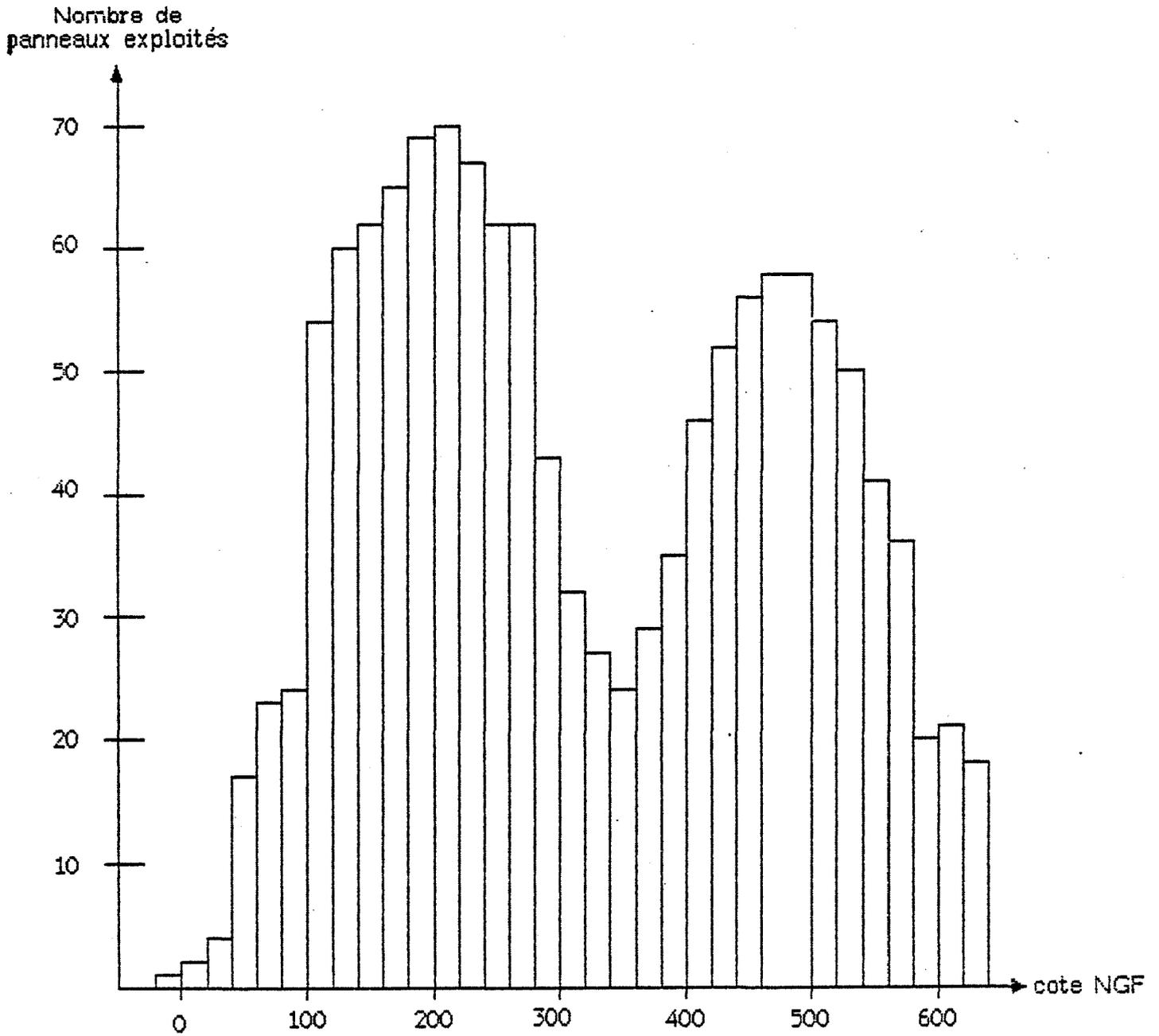


FIGURE N°4-31



HISTOGRAMME D'INTENSITE DES TRAVAUX : CONCESSION DE LA BERAUDIÈRE

ETAGE	300-350	350-400	400-450	450-500	500-550	550-600
S	0.013	0.018	0.060	0.068	0.057	0.010
T	0.12	0.19	0.66	0.75	0.62	0.09

Pour la concession de Varenne le niveau le plus intensément exploité est compris entre les cotes 130 et 140, pour celle de Malafolie entre les cotes 240 et 250. Les valeurs de coefficient d'emmagasinement initiales de ces niveaux pour les deux divisions sont respectivement 3 à 7% et 6%, celles de la perméabilité sont de  $0.75 \cdot 10^{-4}$  et  $0.25 \cdot 10^{-4}$ . Ces valeurs intègrent l'ancienneté des travaux de la division de Malafolie par rapport à ceux de la division de Varenne.

Les valeurs adoptées pour les travers-banc sont de 0.04 pour le coefficient d'emmagasinement, et  $4 \cdot 10^{-3}$  m/s pour la perméabilité, soit une transmissivité de  $4.00 \text{ m}^2/\text{s}$  pour une coupe de 1000 mètres d'épaisseur.

#### IV-3-3-2 - Situation et description des coupes

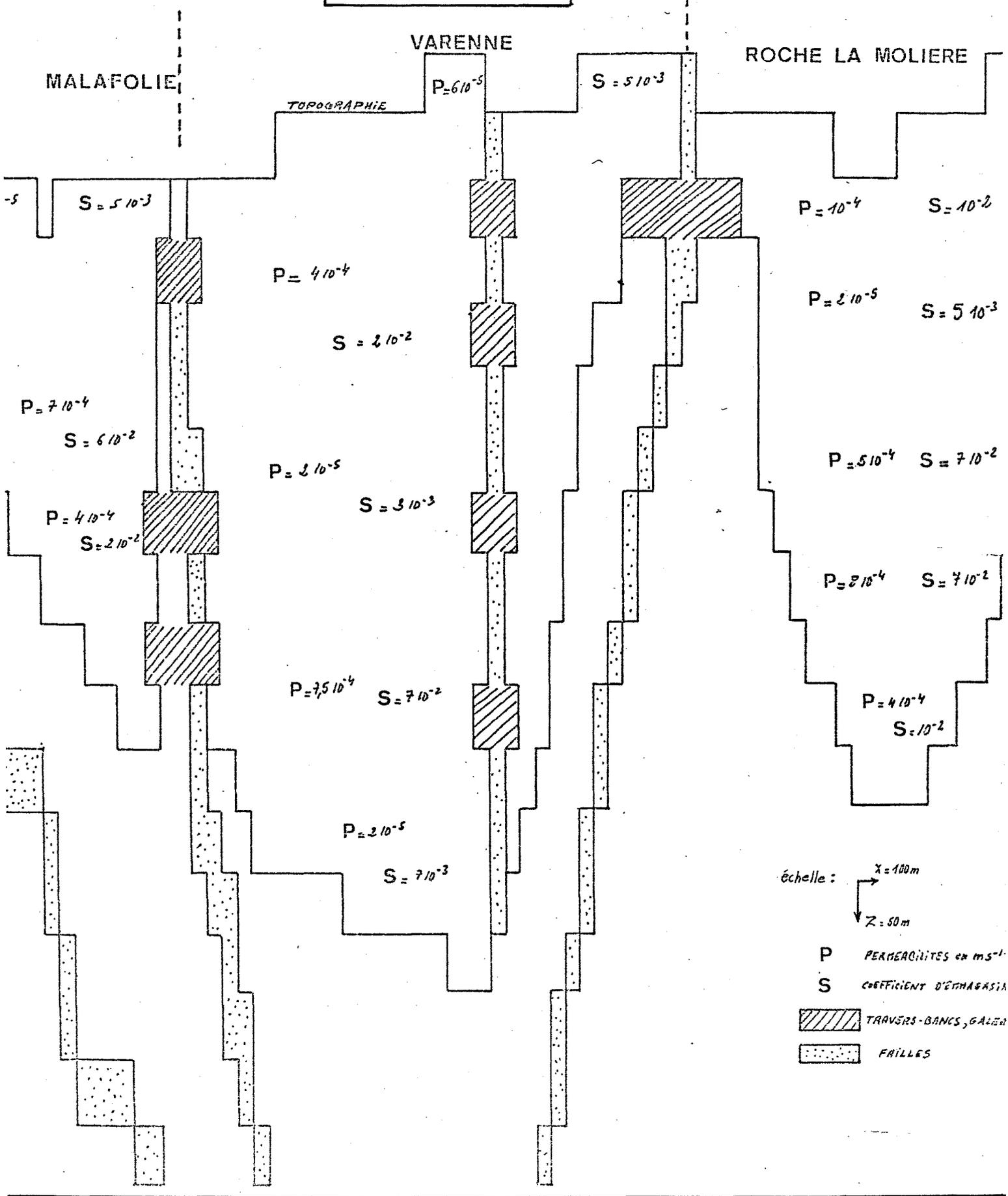
Le domaine concerné par la coupe "NORSUD" a été discrétisé suivant le même principe que celui décrit pour la division de Roche-la-Molière qui se retrouve donc au nord de la coupe modélisée (figure n°4-32) et communique avec la division de Varenne par un travers-banc situé dans la maille comprise entre les cotes 440 et 490 (travers-banc Bouchetière cote 450).

Les mailles situées entre les colonnes 49 et 54 de la ligne n°4 (440 à 490) constituent ce travers-banc qui représente une communication potentielle entre les deux divisions séparées par la faille de Dourdel-Montsalson dont les valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement ont été initialisées respectivement à  $5 \cdot 10^{-7}$  et  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s. Les mêmes valeurs seront retenues pour les autres failles du modèle dont la conductivité hydraulique est en général très faible.

Au travers de la faille du Platon, qui divise la division de Varenne, quatre niveaux de communications ont été introduits (40,190,390,440).

FIGURE N°4-32

MODELE "NORSUD"



A l'extrémité sud de la coupe, la faille du Breuil borde la division de Malafolie reliée à celle de Varenne par trois niveaux de travaux permettant de traverser la faille des Trois-Ponts.

Signalons que cette coupe bidimensionnelle ne peut faire état des relations existant entre la concession de Montrambert et la division de Varenne ; la simulation de la remontée du niveau d'eau à Varenne au-dessus de la cote -136 est directement dépendante de la remontée dans la concession de Montrambert qui devrait se situer à un niveau identique.

Un deuxième maillage a été réalisé, pour représenter une coupe de direction générale Est-Ouest qui traverse les concessions de la Béraudière et Montrambert, rejoint la division de Varenne au niveau du puits d'Alus (annexe n°1), puis suit jusqu'à la division de Malafolie la même trajectoire que la coupe Nord-Sud.

Cette coupe, dont le maillage est représenté sur la figure n°4-33, suit notamment le travers-banc reliant la concession de Montrambert à la division de Varenne.

On y note la présence de trois failles importantes et imperméables :

- La faille des Maures sépare les concessions de Montrambert et de la Béraudière, elle n'est traversée par aucune communication.
- La faille des Trois-Ponts sépare les divisions de Varenne et de Malafolie, elle a été traversée à différents niveaux par les travaux.
- La faille De Maistre limite, au sud, les travaux de la division de Malafolie.

On ne connaît pas de faille importante entre la division de Varenne et la concession de Montrambert, qui représentent les deux flancs d'un même synclinal dont la partie centrale est inexploitable du fait de la profondeur excessive des couches de charbon.

Ces deux zones de travaux ne sont donc séparées que par une zone de terrains non exploités à très faible perméabilité.

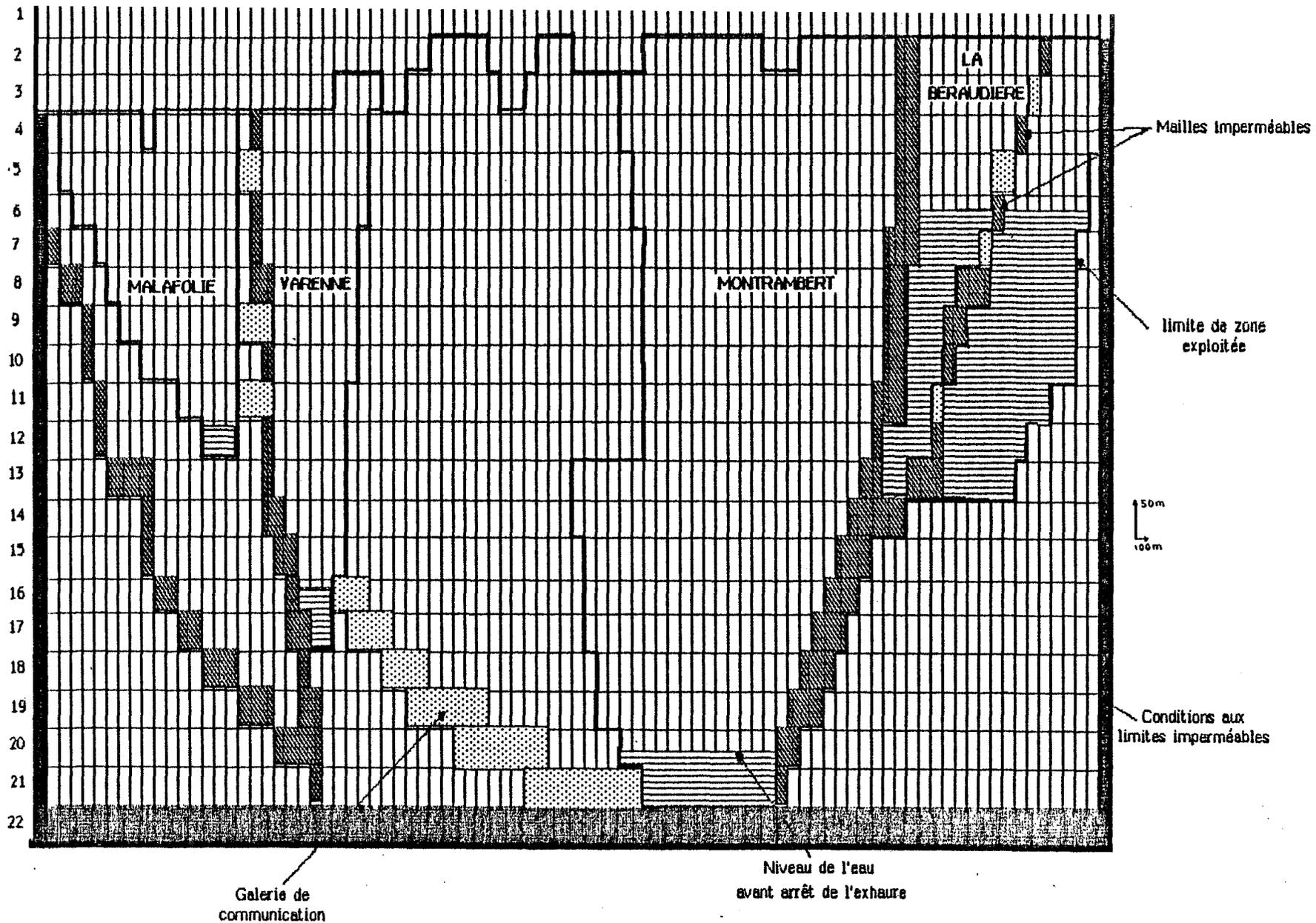


FIGURE N° 4-33  
 MAILLAGE DE LA COUPE EST-OUEST

IV-3-3-3 : Les simulations effectuées

Une première stratégie de simulation avait été prévue avant l'arrêt de l'exhaure en janvier 1984. Elle consistait à alterner les simulations entre les coupes Nord-Sud et Est-Ouest, afin de pouvoir intégrer l'influence sur la remontée du niveau d'eau, des diverses communications existant entre les zones de travaux.

En effet, avant cette date, l'ignorance restait entière en ce qui concerne l'état de ces différentes communications, il était alors notamment impossible de s'assurer de l'ouverture des galeries reliant la division de Roche-la-Molière à celle de Varenne (cote +450 m.), la division de Varenne à la concession de Montrambert (cote -136 m. à -320 m.), ainsi que de celle du très vieux travers-banc reliant les concessions de la Béraudière et de Varenne (cote +356 m.)

Si toutes ces communications avaient été ouvertes, le niveau de l'eau dans la division de Varenne aurait été dépendant, à la fois, de celui de la concession de Montrambert et de celui de la Division de Roche-la-Molière, qui ne se situent pas sur la même coupe.

Il aurait alors été indispensable d'alterner les simulations entre les coupes Nord-Sud et Est-Ouest, en tenant compte pour chaque nouveau pas de temps, des résultats obtenus sur l'autre coupe pour la même période.

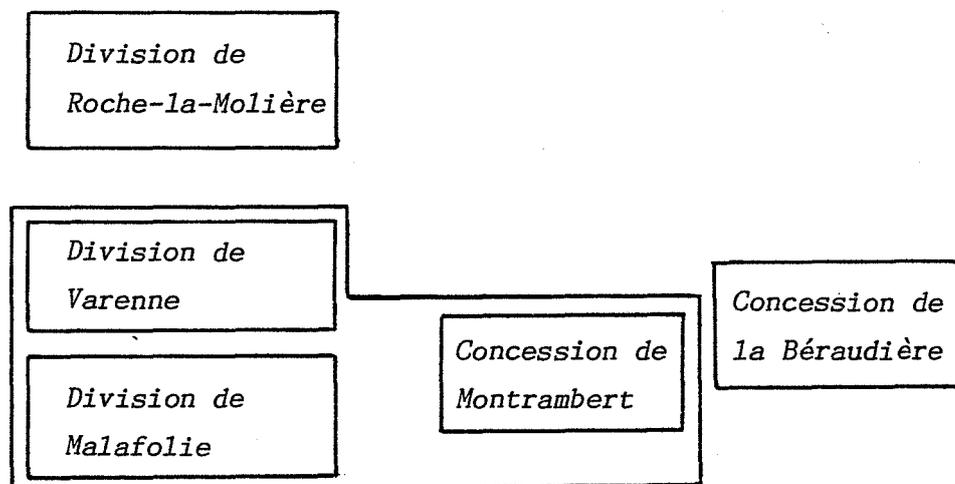
La mise en oeuvre d'une telle procédure de simulation aurait été longue et difficile et elle aurait nécessité, notamment, la création d'un système pratique de récupération et de transfert des résultats d'un fichier dans un autre pour les divisions de Varenne et de Malafolie communes aux deux coupes. D'autre part, l'impossibilité de simuler conjointement l'influence de Roche-la-Molière et celle de Montrambert, sur la division de Varenne aurait probablement provoqué l'apparition d'erreurs importantes dans la simulation.

Fort heureusement, la remontée du niveau de l'eau, suivie depuis l'arrêt de l'exhaure en janvier 1984, a permis de statuer définitivement en ce qui concerne l'état des différentes communications. Les observations effectuées montrent que :

- Le travers-banc Bouchetière n'assure plus la communication Roche-la-Molière - Varenne : la division de Roche-la-Molière paraît donc isolée

- Les galeries de communication Varenne - Montrambert assurent le transfert total des eaux de la division de Varenne vers la concession de Montrambert.
- Il n'existe plus de communication entre les concessions de Montrambert et de la Béraudière, cette dernière se trouve donc isolée du reste du système.

L'ensemble du système étudié peut donc être schématisé de la façon suivante :



Si les zones de travaux de Roche-la-Molière et de la Béraudière sont isolées, par contre celles de Malafolie, Varenne et Montrambert dépendent les unes des autres et forment un "sous-système" unique, ce qui se matérialise à l'heure actuelle par une remontée rapide du niveau de l'eau dans la concession de Montrambert qui reçoit les eaux des divisions de Malafolie et de Varenne dans lesquelles le niveau de l'eau reste stable.

La coupe Nord-Sud devenait donc inutile. Les simulations n'ont donc porté que sur la coupe Est-Ouest et, indépendamment, sur la concession de Roche-la-Molière.

Les premiers pas de temps effectués sur la coupe Est-Ouest, et destinés à retrouver les niveaux d'eau mesurés pendant la première période de la remontée, ont permis de tirer quelques enseignements concernant les paramètres hydrodynamiques des terrains pour les différentes concessions modélisées.

La méthode d'estimation présentée au §IV-3-3-1 s'est avérée relativement satisfaisante en ce qui concerne la concession de Montrambert. Par contre, les coefficients d'emménagement et les perméabilités prévus pour la division de la Béraudière se sont révélés beaucoup trop élevés.

En effet, le niveau de l'eau mesuré dans la concession est monté d'environ 50 mètres en un an, alors que les résultats obtenus par simulation, pour un pas de temps d'un an, donnent une montée du niveau d'eau n'excédant pas 30 mètres.

Un tel écart entre les résultats réels et les résultats simulés révèle une insuffisance dans la méthode de prévision des paramètres hydrodynamiques du milieu. Il semble en effet, que le facteur "structure géologique" de la concession n'a pas été pris en compte de façon suffisante.

La figure n°4-34 matérialise la largeur de la coupe modélisée (1000 m.) par rapport aux zones de travaux étudiées. On constate, que pour la division de Roche-la-Molière, la coupe modélisée se trouve entièrement dans la zone de travaux. De plus, cette division présente une structure géologique simple avec des couches de charbon importantes, non morcelées, et dont le pendage est régulier et relativement faible.

A l'inverse, pour la concession de la Béraudière, comme pour la division de Varenne, l'épaisseur de la coupe dépasse par endroits la zone d'influence des travaux. Par ailleurs, pour ces deux secteurs, les couches géologiques sont beaucoup plus "chahutées" (pendage variable, existence de petites failles etc...); une telle structure a sans doute rendu l'exploitation du charbon plus difficile, plus morcelée et moins intensive.

Les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère minier, résultant essentiellement de l'intensité et du mode d'exploitation du charbon, sont donc beaucoup plus faibles pour ces deux secteurs que pour celui de Roche-la-Molière.

Le calage de la première année de remontée dans la concession de la Béraudière a en effet révélé qu'il était nécessaire de diviser pratiquement par 10 les paramètres T et S prévus, pour tenir compte de la structure géologique de la concession et de la plus grande ancienneté de ses travaux (fermeture du puits des Combes en 1966).

Pour les mêmes raisons, les paramètres de la division de Varenne ont aussi été diminués, mais dans des proportions moins importantes compte tenu de l'exploitation récente de certaines couches de charbon dans la division (quartier du Bessy ouvert jusqu'en 1984).

Le tableau de données définitif retenu pour la coupe Est-Ouest

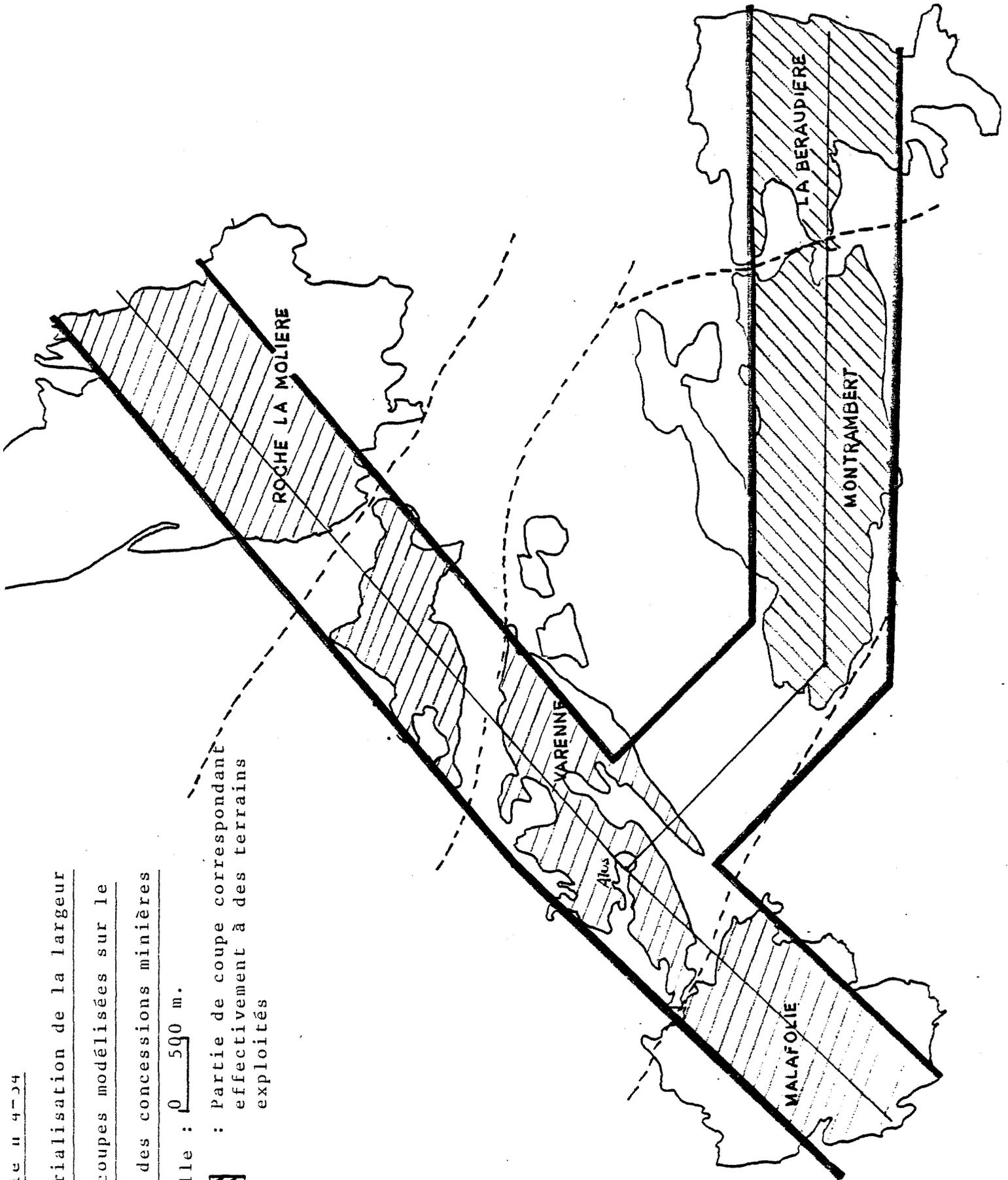
FIGURE N° 4-24

Matérialisation de la largeur  
des coupes modélisées sur le  
plan des concessions minières

Echelle : 0 500 m.



: Partie de coupe correspondant  
effectivement à des terrains  
exploités



est présenté en annexe n°8.

Les pas de temps choisis pour les différentes simulations sont variables mais toujours de l'ordre de l'année, c'est-à-dire bien supérieurs au pas de temps d'un mois choisi pour le calage du modèle sur Roche-la-Molière.

La précision demandée pour les différents pas de temps est plus faible que celle demandée sur Roche-la-Molière, elle est de l'ordre de  $10^{-1}$ .

Le maillage représentant la coupe Est-Ouest comprend 90 colonnes et 22 lignes, les calculs sont longs et la convergence difficile compte tenu de l'hétérogénéité des terrains, de la différence de vitesse de remontée entre les diverses concessions etc...

Ceci a rendu très délicate l'optimisation du coefficient de surrelaxation OMEGA qui dépend directement de l'importance des variations de la matrice de calcul.

Le nombre des itérations nécessaires à la convergence a donc toujours été très grand, et le temps de calcul très long.

#### IV-3-3-4 - Résultats

Afin d'alléger la présentation des résultats, les niveaux d'eau obtenus pour les différents pas de temps sur les différentes concessions ont été reportés sous forme de courbes sur les figures n°4-35 à 4-37.

Etant donné les difficultés rencontrées lors des simulations, et exposées ci-dessus, ces résultats doivent être pris comme une prévision moyenne du temps de remontée de l'eau jusqu'à la surface.

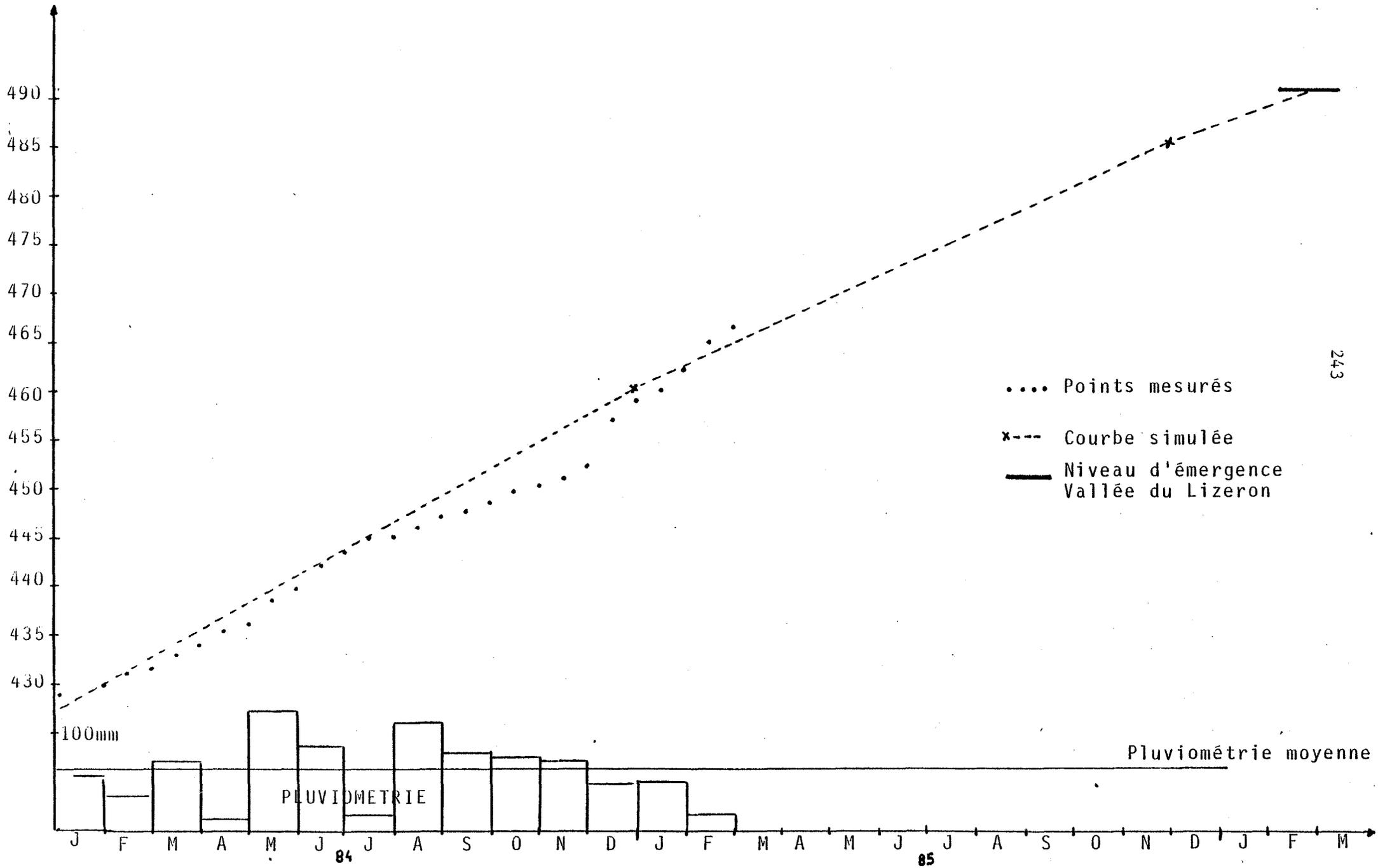
Considérons que cette prévision est faite à 4 à 5 mois près environ pour la concession de la Béraudière où l'émergence pourrait donc se produire dans 2,8 ans  $\pm$  5 mois (durant l'hiver 1987), et à un an près pour les autres zones de travaux où la cote démergence la plus basse (+456 m.) devrait être atteinte dans une quinzaine d'années (à l'an 2000 !).

Une représentation plus imagée de ces résultats est présentée dans les figures n°4-38 à 4-42, elle permet de mieux comprendre la répartition

MONTEE DU NIVEAU DE L'EAU DANS  
LA DIVISION DE ROCHE - LA - MOLIÈRE

FIGURE 4-35

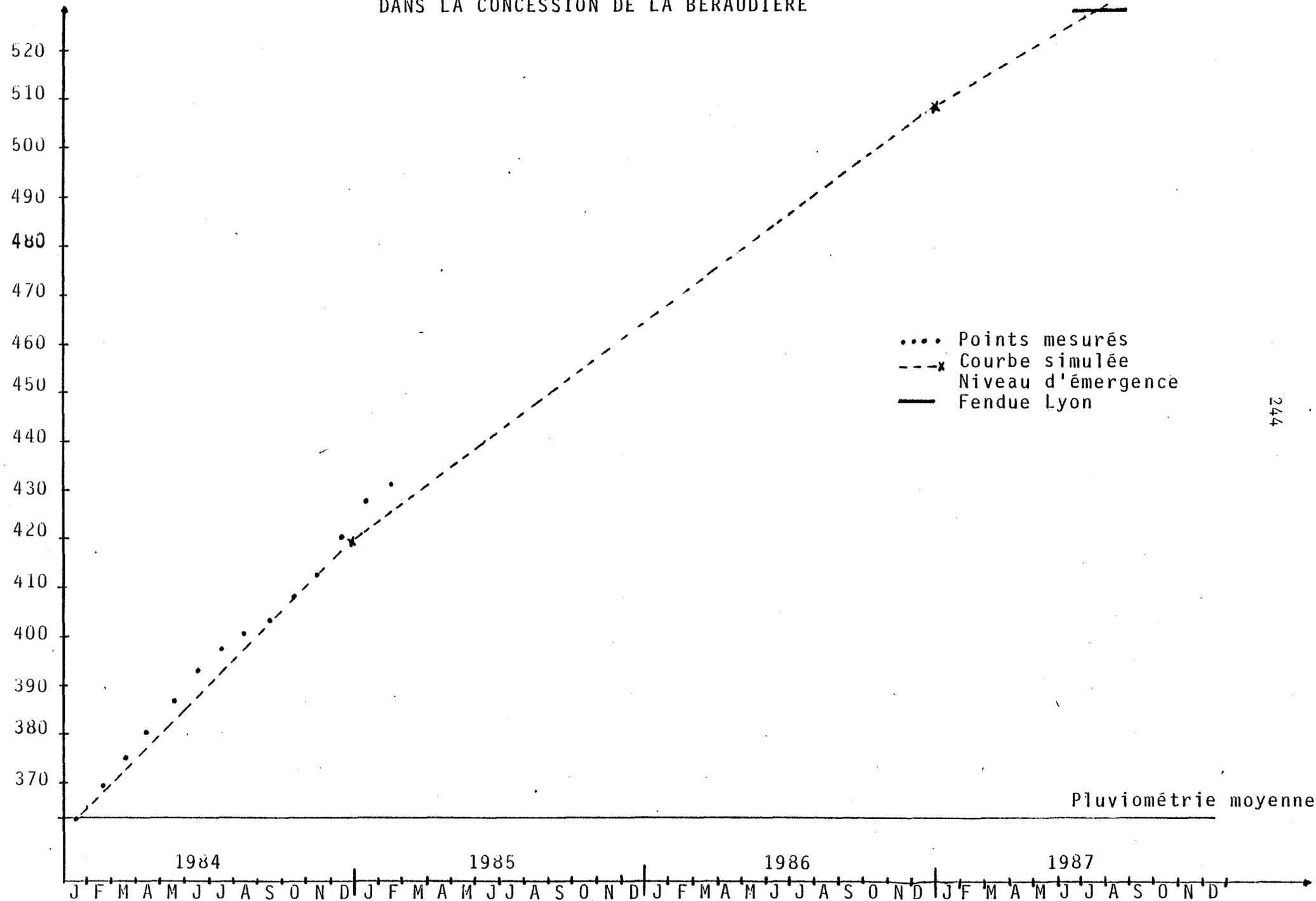
Niveau(NGF)



MONTEE DU NIVEAU DE L'EAU  
DANS LA CONCESSION DE LA BERAUDIÈRE

FIGURE 4-36

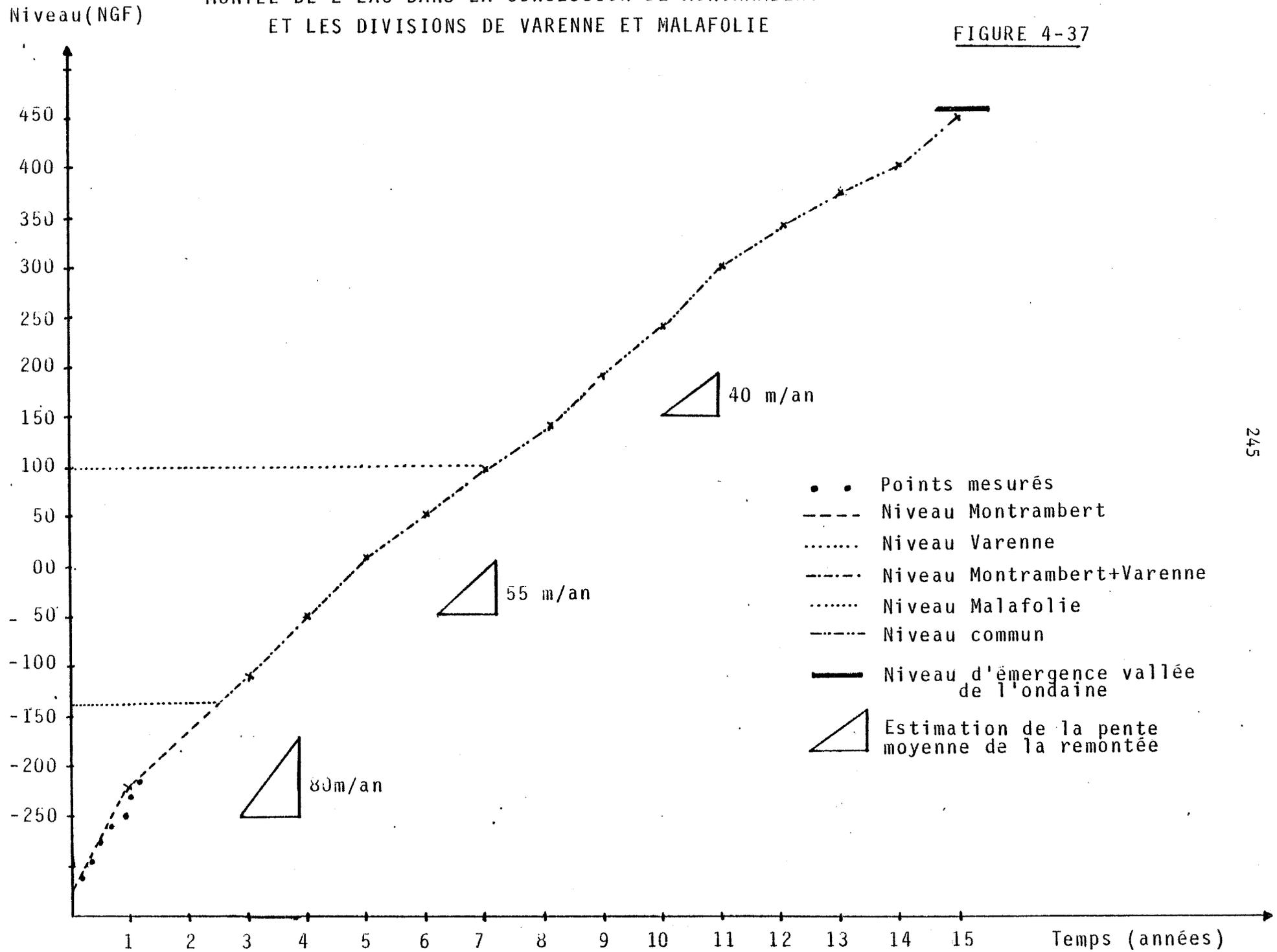
Niveau (NGF)

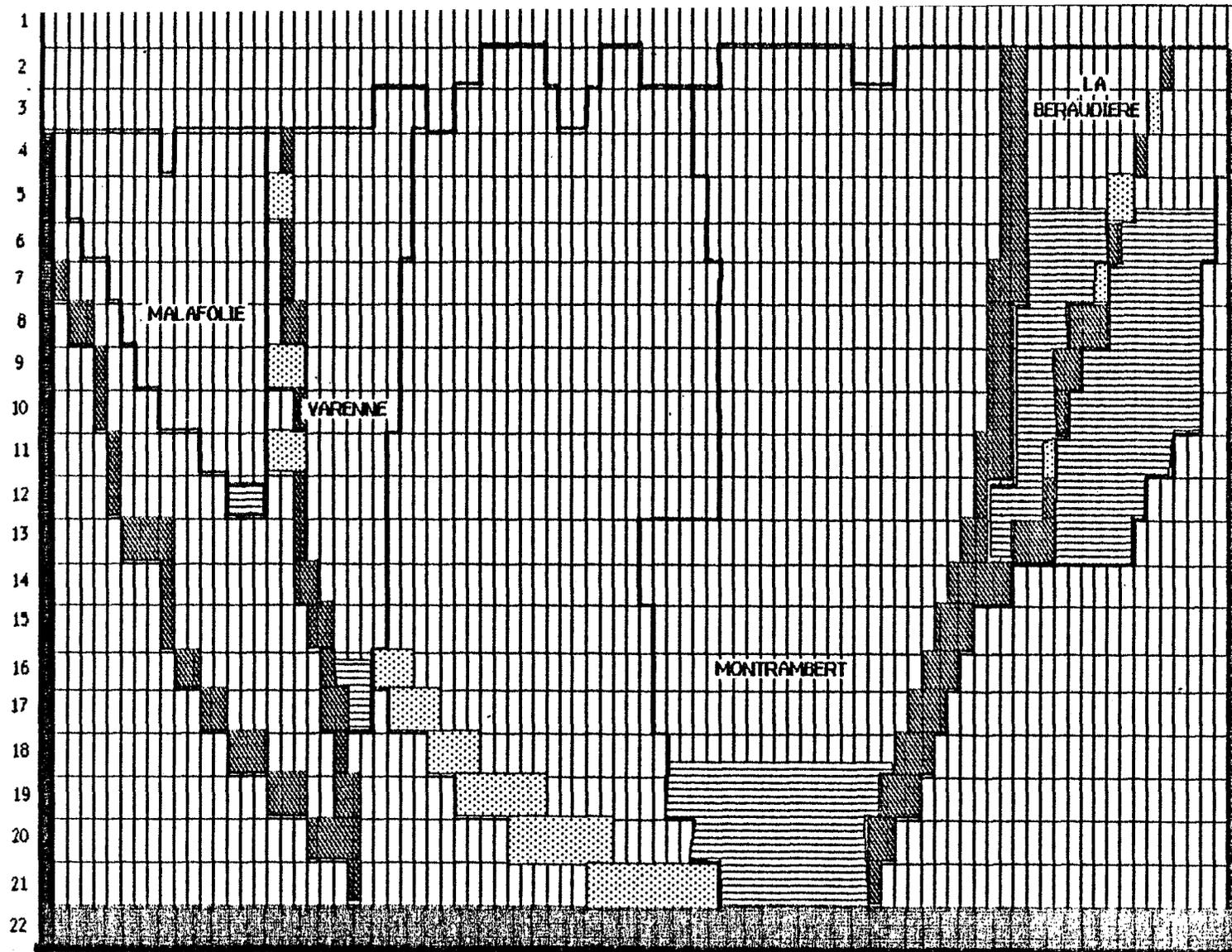


Pluviométrie moyenne

MONTEE DE L'EAU DANS LA CONCESSION DE MONTRAMBERT  
ET LES DIVISIONS DE VARENNE ET MALAFOLIE

FIGURE 4-37



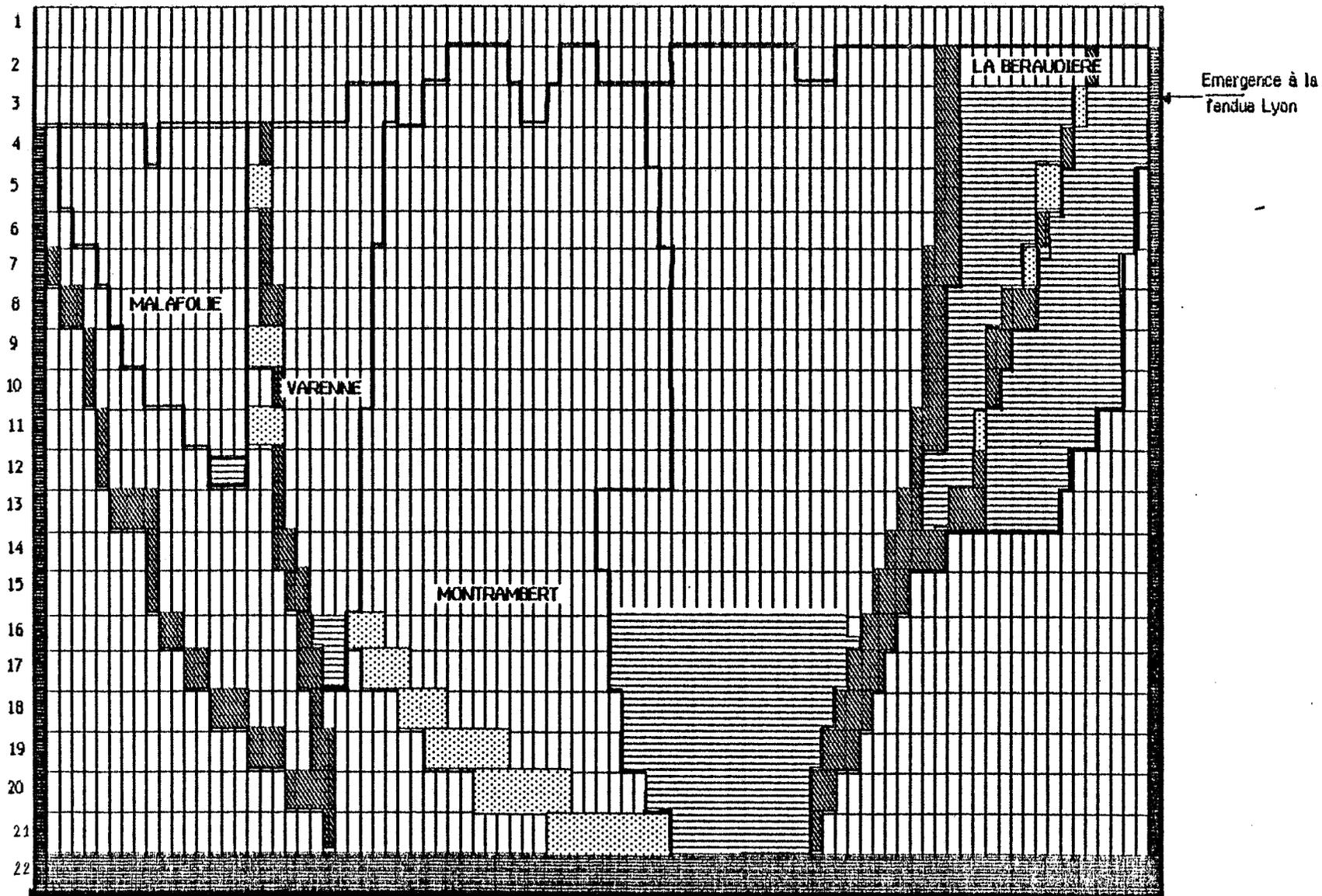


Remarque : le niveau de l'eau n'a pas bougé dans la division de Varenne, il monte très rapidement dans la concession de Montrambert (une centaine de mètres par an). La remontée est aussi assez rapide dans la concession de la Béraudière (une cinquantaine de mètres par an), cette concession est isolée du reste du système.

FIGURE N°4-38

NIVEAUX D'EAU APRES UN AN DE REMONTEE

COUPE EST-OUEST



Remarque : le niveau de l'eau dans la concession de la Béraudière a atteint la cote de la fendue Lyon, il y a donc émergence dans cette concession. La remontée va commencer dans la Division de Varenne, avec un niveau d'eau semblable à celui de la concession de Montrambert, compte tenu de la communication franche qui existe entre ces deux zones de travaux. Dans la division de Malafolie, on peut penser que le niveau d'eau reste toujours statique.

**FIGURE N°4-39**

**NIVEAUX D'EAU APRES TROIS ANS DE REMONTEE**

**COUPE EST-OUEST**

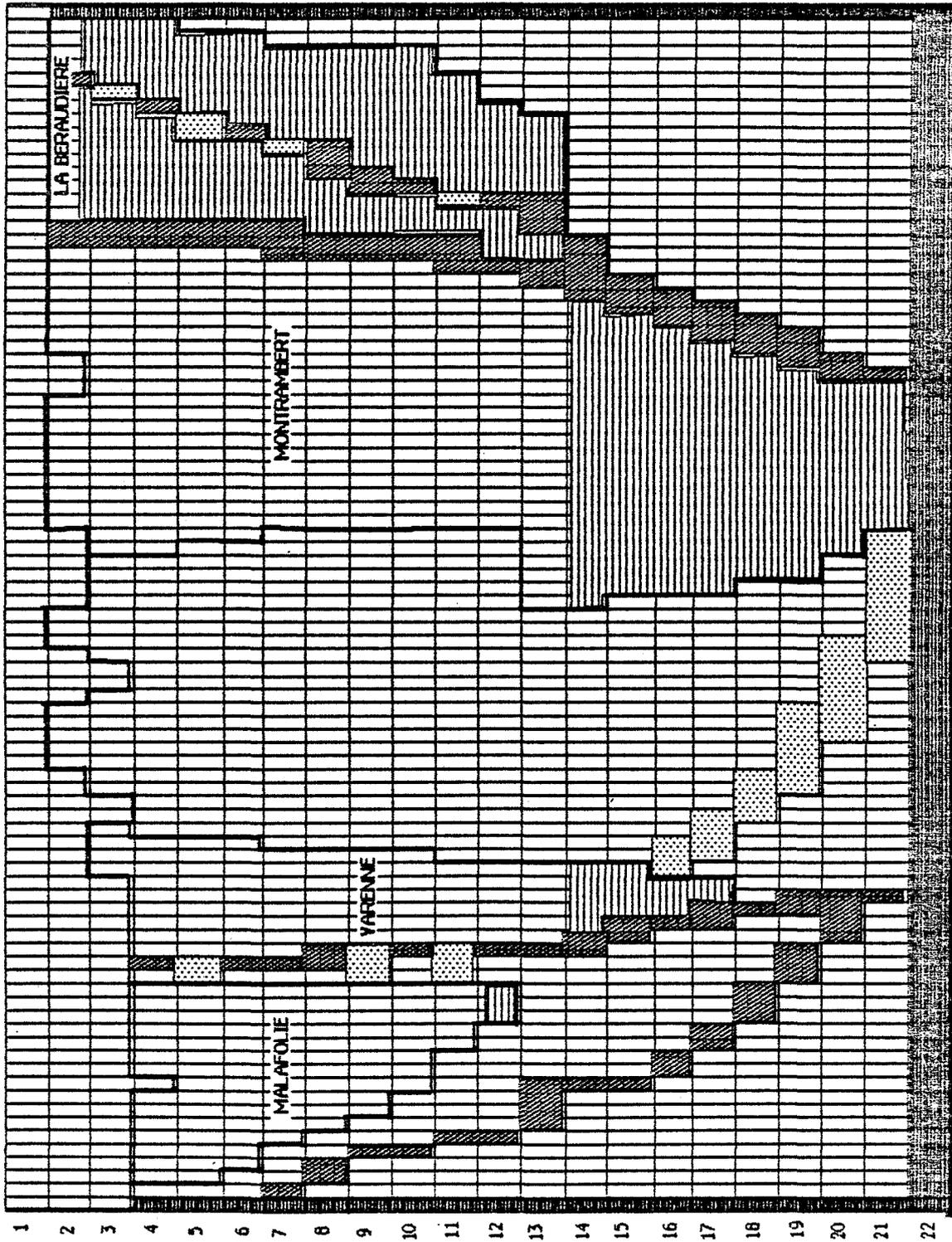
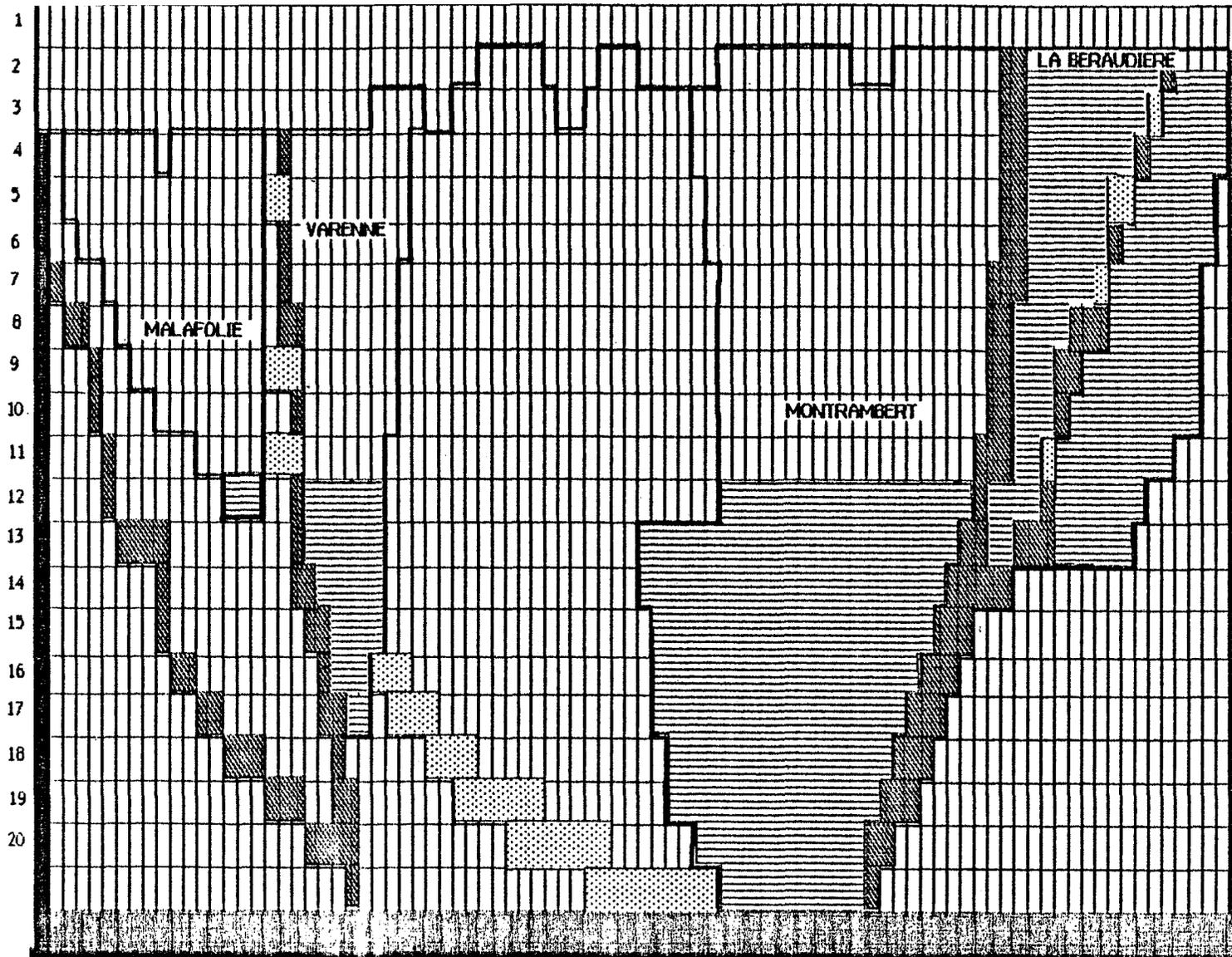


FIGURE N° 4-40

NIVEAUX D'EAU APRES 5 ANS DE REMONTÉE

COUPE EST-OUEST

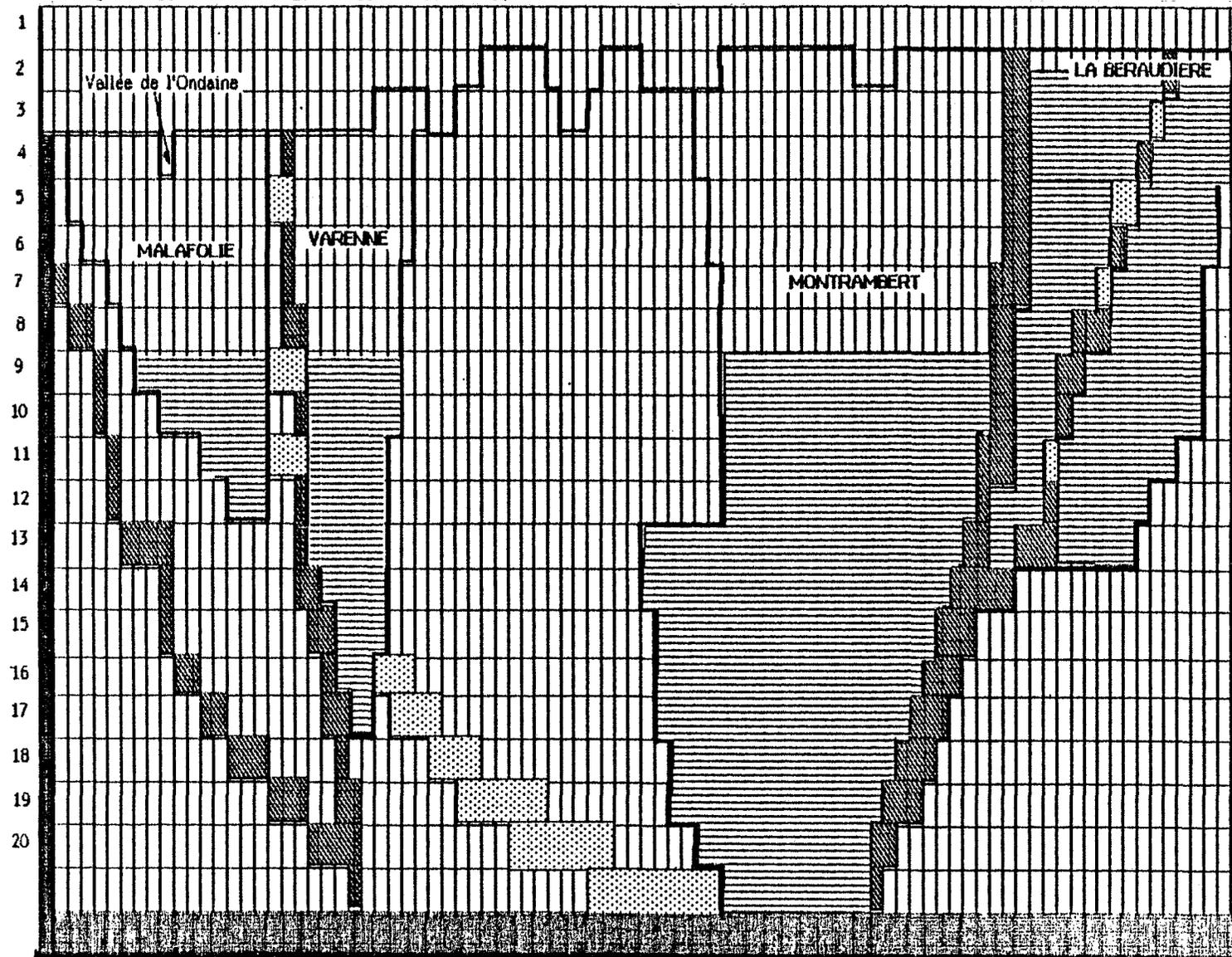


Remarque : l'eau, toujours à la même cote dans les travaux de Varenne et de Montrambert, arrive au niveau de la communication entre les divisions de Varenne et de Malafolie. La vitesse de remontée va légèrement diminuer, et le niveau d'eau sera semblable dans les trois zones exploitées. Dans la concession de la Béraudière, le niveau est stabilisé depuis environ quatre ans (date d'émergence).

**FIGURE N°4-41**

**NIVEAU D'EAU APRES 7 ANS DE REMONTEE**

**COUPE EST-OUEST**



Remarque : les niveaux d'eau sont semblables pour les trois zones de travaux en communication (Varenne, Malafolie, Montrambert). La remontée se poursuivra ainsi jusqu'aux environs de l'année 2000, date à laquelle la cote de l'Ondaine sera atteinte dans la division de Malafolie, avec l'apparition d'une émergence, les niveaux d'eau se stabiliseront.

**FIGURE N°4-42**  
**NIVEAUX D'EAU APRES 10 ANS DE REMONTEE**

**COUPE EST-OUEST**

des potentiels pour la coupe Est-Ouest lors des différentes simulations.

On constate que :

- le niveau d'eau dans la concession de la Béraudière est totalement indépendant de celui des autres concessions.
- le niveau de l'eau dans la division de Varenne ne présente pas de variations tant que celui de la concession de Montrambert n'a pas atteint la cote -136 m. (soit environ après 2,5 ans de remontée : printemps 1986). A partir de cette date, le niveau de l'eau dans ces deux secteurs sera sensiblement le même.
- il faut ensuite attendre la fin de la 7<sup>ème</sup> année de remontée pour que l'eau atteigne la cote +100 m. et puisse rejoindre les travaux de la division de Malafolie.

L'inflexion provoquée sur la courbe de remontée par le remplissage des travaux de la division de Malafolie est beaucoup moins importante que celle provoquée par le remplissage des travaux de la division de Varenne, ce qui s'explique par l'ancienneté de la division dont les derniers travaux datent de 1961.

Pour toute la fin de la remontée, dans l'hypothèse retenue, c'est-à-dire dans le cas où les galeries restent ouvertes, le niveau de l'eau est le même dans les divisions de Malafolie et de Varenne, et dans la concession de Montrambert.

Il serait intéressant de relancer des simulations en prévoyant, par exemple, le colmatage des galeries reliant ces trois concessions, on peut penser que dans ce cas, l'émergence se produirait plus tôt dans la division de Malafolie que dans la concession de Montrambert.

#### V - Conclusions

La tentative de modélisation de la remontée du niveau d'eau dans les concessions minières par la méthode des éléments finis, s'est révélée infructueuse, compte tenu des déformations importantes imposées au maillage dès

les premiers temps de la simulation.

C'est la raison pour laquelle il a été nécessaire de mettre au point un logiciel de simulation utilisant la méthode des différences finies.

Cette méthode, plus classique a cependant nécessité des aménagements importants pour être adaptée à une modélisation en coupe et dans un milieu très hétérogène (processus de noyage/dénoyage, failles imperméables etc...).

Le logiciel mis au point a , dans un premier temps, été testé sur un petit maillage représentant la division de Roche-la-Molière.

Le calage progressif de la courbe de remontée du niveau de l'eau dans la division suite à l'arrêt de l'exhaure minière en 1977, s'est avéré satisfaisant : les écarts mesurés entre la courbe réelle et la courbe simulée n'excèdent pas 8%.

Cette première simulation a apporté des enseignements intéressants en ce qui concerne :

- la mise au point des programmes
- les problèmes de détermination du coefficient de surrelaxation OMEGA.
- Les paramètres hydrodynamiques des terrains en fonction de l'intensité de l'exploitation.

Afin de pouvoir simuler à l'aide du logiciel mis au point et testé sur Roche-la-Molière, la remontée du niveau de l'eau dans les autres concessions, et compte tenu de l'absence de données concernant les paramètres hydrodynamiques de ces concessions, une méthode d'estimation de ces paramètres a été élaborée.

Cette estimation faite à l'aide de la connaissance des panneaux de charbon exploités, de l'ancienneté de l'exploitation et de la structure géologique des terrains, a été affinée grace au calage de la première année de remontée du niveau d'eau dans ces concessions.

Si elle a permis de préciser la connaissance du terrain, l'incertitude reste grande et il faut donc admettre avec beaucoup de circonspection les résultats exposés dans le dernier chapitre de cette partie.

Les simulations effectuées nous permettent cependant de conclure que le niveau de l'eau atteindra la surface dans la division de Roche-la-Molière au printemps 1986, dans la concession de la Béraudière au début de l'année 1987, et pour le système Montrambert, Malafolie, Varenne dans une quinzaine d'années.

La prévision de ces résultats, obtenus par simulation, n'était évidemment pas très difficile à faire par des méthodes plus simples, pour le site étudié, compte tenu de la relative linéarité des courbes de montée du niveau de l'eau.

La mise au point d'un logiciel de simulation pour le site étudié, n'était pas indispensable. Cependant, les problèmes de remontée de nappe vont devenir de plus en plus courants en raison de la fermeture des mines, et des problèmes liés à l'arrêt de l'exhaure risquent à nouveau de se présenter.

L'originalité et l'intérêt du logiciel mis au point tiennent à l'adaptation de la méthode des différences finies pour une modélisation en coupe, dans un milieu hétérogène, mais aussi au fait que les programmes sont prévus pour permettre la simulation d'une montée du niveau d'eau, même si elle se fait sur une très grande épaisseur.

L'amélioration la plus importante qui pourrait être apportée à ce travail, serait d'y introduire la possibilité d'utiliser un maillage à taille variable qui permettrait de prendre en compte de façon plus précise l'hétérogénéité des terrains.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les zones exploitées des terrains stéphaniens du bassin houiller de la Loire, constituent des secteurs à perméabilité privilégiée dans lesquels l'arrêt de l'exhaure minière va provoquer une montée du niveau de l'eau. Le comportement hydraulique de l'ensemble de ce système aquifère composé de plusieurs sous-systèmes correspondant aux différentes divisions et concessions minières, dépend de la nature et de l'état des communications qui les relient les unes aux autres.

La connaissance de l'état actuel des travaux, travers-bancs et galeries existant entre deux concessions, permet soit de regrouper en un sous-système unique certaines divisions ou concessions, soit de les considérer comme des systèmes aquifères indépendants. Les divisions de Varenne et Malafolie et la concession de Montrambert constituent actuellement un système unique ; la division de la Tour est isolée ; la concession de la Beraudière ainsi que la Division de Roche-la-Molière sont très probablement indépendantes.

Cependant, l'état des communications est susceptible d'être modifié étant donné le caractère évolutif du milieu minier, ce qui nécessite la prise en compte d'autres scénarios ou hypothèses de communication entre les zones exploitées (exemple : oblitération des galeries reliant la concession de Montrambert à la division de Varenne).

Compte tenu de ces observations et de ces hypothèses, les différentes zones d'émergence prévisibles dues à l'arrêt de l'exhaure minière, se localisent dans les points bas de chaque unité, en particulier si ils correspondent à un affleurement de charbon, ou se situent à l'aplomb de travaux proches de la surface (présence de fendues).

La stratégie de surveillance établie et développée sur le terrain en fonction de ces résultats comporte les éléments suivants :

- mesure régulière du niveau de l'eau dans les cinq puits de mine laissés ouverts à cet effet.
- mesure régulière de la piézométrie et suivi chimique de la qualité de l'eau dans les sept piézomètres implantés (début 1984) étant donné la présence d'eau superficielle relevée dans ces ouvrages dès leur implantation.

- la prévision de l'évolution des niveaux d'eau dans les différentes concessions et celle de l'échéance des émergences s'effectuera à l'aide de l'outil de simulation appliqué au site modélisé.

L'ajustement des caractéristiques des terrains (transmissivité et coefficient d'emmagasinement), difficiles d'accès mais nécessaires à la modélisation, pour le calage du modèle hydrodynamique aux différences finies, par rapport à des données de terrains disponibles sur la division de Roche-la-Molière, a permis de s'assurer de la validité de l'outil de simulation employé. Cet outil de prévision servira à déterminer à quelques mois près l'échéance des émergences d'eau de mine suggérées par les différents scénarios plausibles et soumis à la simulation.

La concession pour laquelle la première émergence apparaîtra est celle de Roche-la-Molière, et ce au cours du printemps 1986.

Pour la concession de la Béraudière, le niveau de l'eau arrivera à la cote de la fendue Lyon au début de l'année 1987. Pour le reste du système, c'est en l'an 2000 environ, que devrait apparaître une émergence dans la vallée de l'Ondaine.

L'étude de la qualité chimique des eaux qui s'imposait pour définir un indicateur de l'arrivée du niveau de l'eau de mine dans les piézomètres et en surface, établit que les éléments qui permettent de distinguer une eau ayant transité dans des travaux minier sont essentiellement la température, le titre alcalimétrique complet (T.A.C.), la teneur en ion sodium élevée et la quantité de magnésium supérieure à celle en calcium.

L'évolution de ces paramètres au cours du remplissage des travaux miniers est telle qu'une fois arrivées en surface, les eaux ne présentent qu'un caractère peu agressif. Cet autre paramètre notamment étudié vis-à-vis des bétons permet de classer ces eaux dans le groupe des eaux faiblement à modérément agressives.

Les essais effectués in-situ confirment ce caractère : parmi les éprouvettes testées dans les émergences existant sur le secteur de Saint-Etienne, aucune n'a atteint le seuil de gonflement de 800 microns/m en six mois au delà duquel les bétons étudiés seraient alors endommagés.

A priori, l'arrêt définitif de l'exhaure dans les travaux des vallées de l'Ondaine et du Lizeron serait concevable dans la mesure où ce secteur où la topographie est bien marquée se trouve convenablement drainé en surface, d'autant plus que le bilan en eau montre que les débits d'émergence seraient au maximum égaux à ceux de l'exhaure minière jusqu'alors rejetés dans le milieu, et que l'eau n'est pas agressive vis-à-vis des bétons. Des réserves sont toutefois à formuler en ce qui concerne la concession de la Beraudière sur laquelle le drainage naturel des terrains a disparu de part la canalisation du Merdant et le remblayage de sa vallée.

L'utilisation conjuguée des différentes méthodes indiquées (mesures piézométriques, analyses chimiques, simulation), a permis non seulement d'accroître les connaissances du milieu correspondant au site d'étude, mais aussi de constituer une stratégie de surveillance fiable.

Cependant, l'influence de l'arrêt de l'exhaure en surface reste difficile à établir précisément car elle est liée à un certain nombre d'hypothèses qui demandent à être étayées dans le futur par l'enregistrement des observations indispensables pour poursuivre la stratégie préconisée.

Dans ce sens des études complémentaires seraient nécessaires, en particulier, le calage progressif du modèle hydrodynamique qui ne peut s'effectuer qu'à partir d'un suivi piézométrique régulier et l'optimisation des lieux de pompage en cas de nécessité de reprendre l'exhaure (réalisable à l'aide du modèle de simulation hydrodynamique).

Il est intéressant de signaler les possibilités de ressources géothermiques qu'offrent les eaux issues de la mine (température d'exhaure entre 20 et 28°C), ce qui pourrait constituer l'aspect positif de l'arrêt de l'exploitation minière et dont la rentabilité serait à étudier.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHIVES HOUILLERES DE LA LOIRE :

- M.BEAUNIER (1813) : Mémoire sur la topographie extérieure et souterraine du territoire houiller de Saint-Etienne et de Rive de Gier (Département de la Loire).  
Reconnaissance du territoire houiller de l'arrondissement de Saint-Etienne.
- M.COSTE (1899) : Etude des gites minéraux de la France. Nouvelles contributions à la topographie souterraine du bassin de la Loire.  
Paris Imprimerie Nationale 1899
- J.DEMAISTRE (1953) : Atlas géologique des exploitations dans le bassin houiller de la Loire.
- L.GRUNER (1882) : Etude des gites minéraux de la France - Bassin houiller de la Loire.  
Publiées sous les auspices de M. le Ministre des Travaux Publics par le service des topographies souterraines.
- Plans minutes des travaux des vallées de l'Ondaine et du Lizeron.

-GEOLOGIE - HYDROGEOLOGIE

- J.ARCAMONE (1979) : Choix des paramètres de prévision en affaissements miniers (synthèse géologique, comparaison de profils, étude de cas).  
CERCHAR, Nancy, 79-76-520 n°9, 12p. 22 fig.
- C.BERGERON-H.DEHAYS-T.POINETT (1983): Remontées des nappes d'eau souterraine, causes et effets.  
Documents B.R.G.M. n°60 - 1983
- A.BLACHERE,P.DAVOINE (1983) : Influence de l'arrêt de l'exhaure minière sur la vallée de l'ondaine - étude préliminaire  
Rapport interne H.B.L. 1983.

- A. BOUROZ (1978) : Essai de synthèse tectonique du bassin houiller de Saint-Etienne.  
Revue Société de l'Ind. Minérale. Oct.78; Vol.60, n°10.extraits, pp.493-519,19fig.,2 cartes,20 ref.
- A. BOUROZ (1978) : Proposition pour une classification chronostratigraphique internationale du carbonifère. La position stratigraphique du faisceau de la Talaudière et du poudingue mosaïque dans le carbonifère de Saint-Etienne  
Revue de la Société de l'Industrie Minérale. Oct.78; Vol.60, n°10.extraits, pp.485-492,4 fig.,15 ref.
- B.R.G.M. (1980) : Etude hydrogéologique du Stéphanois de Saint-Etienne.  
Rapport préliminaire 80 SGN 46 RHA,41 p.et fig.; 116 p.annexes et fig.,22 planches hors texte.
- C. CHAMBON (1969) : Mécanique des terrains houillers dans le cas de déformations planes.  
Technique minière, recueil n°25, Luxembourg 1969, 213 p., 97 fig.
- P. DAVOINE (1983) : Le problème des eaux dans le quartier du Clapier (premiers éléments de réflexion sur leur origine)  
Rapport interne H.B.L. (mars 1983)
- B. DEBAISIEUX (1983) : Géologie appliquée à l'aménagement urbain Saint-Etienne (Loire)  
Thèse 3°cycle- Université Claude Bernard Lyon I -Juillet 1983
- M. DEJEAN (1976) : Le volume d'influence d'une exploitation  
CERCHAR, Nancy, 77-76- 1540 n°573
- J. DEMAISTRE (1963) : Description géologique du bassin houiller de la Loire.  
Revue de l'Industrie Minérale. Juil.Aout 1963 . Vol. 45 n°7 et 8. 59 p., 22 fig., 15 Ref.
- J. LIBICKI (1977) : Impact of gob and power-plant ash disposal on ground-water quality and its control.  
Third Symp. on coal preparation,oct.77, pp.185-204, 6 fig.

- C. LOUIS (1977) : Problèmes de l'exhaure dans les mines.  
Anais do i seminario brasileiro de tecnologia mineral,  
poços de Caldas, MG 27 de junho à 01 de julho de 1977,  
pp.115-121, 11fig., 12 ref.
  
- Cabinet M.MERLIN (1981) : Etude des régimes de crue de l'Ondaine. Construction  
d'une prise d'eau sur l'Ondaine pour la station  
d'épuration du Pertuiset.  
Non édité.
  
- J.P. PIGUET (1983) : La modélisation en mécanique des terrains et son  
application à l'exploitation minière.  
Thèse Docteur es-sciences, Institut National Poly-  
technique de Lorraine, Avril 1983, 163 p., 79 fig.
  
- Plan d'Occupation des Sols : La Ricamarie, Le Chambon Feugerolles, Firminy,  
Unieux, Fraisses, Roche-la-Molière.
  
- E.L.J. POTTS (1964) : Etudes courantes sur la mécanique des roches et le  
contrôle des terrains.  
Quatrième conf. intern. sur le contrôle des terrains et  
la mécanique des roches. HENRY CRUMB SCHOOL OF MINES;  
Columbia University New-York. 4-8 mai 1964.
  
- A. PROUST (1964) : Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du  
Nord et du Pas de Calais.  
Revue de l'industrie Minérale Juin et Juillet 1964.
  
- M. SCHMIDT (1978) : Le volume d'influence des exploitations en dressant -  
Influence frontale.  
CERCHAR, Nancy (pas de numéro de référence)
  
- P. SPRUTH (1961) : Comparaison de la dynamique des terrains et du  
comportement du soutènement métallique dans les tailles  
remblayées et dans les tailles foudroyées.  
Troisième conf. intern. sur la pression des terrains,  
Paris 16-20 mai 1960 - Revue de l'Industrie Minérale  
mars 1961 - Numéro spécial, pp.465-480, 12 fig., 5 ref.

- S.R.A.E. Rhône-Alpes et D.D.A. Loire (1982) : Etude des étiages dans le département de la Loire.  
Rapport Interne FD/RA 1982, 26 p., 4 annexes.
- P. STASSEN (1978) : Contrôle des vides ou contrôle de l'arrière taille.  
Université de Liège- Faculté des sciences appliquées.  
Presses Universitaire de Liège - A.S.B.L.
- V. VIDAL (1961) : Exploitation des Mines - Tome I : Travaux miniers  
Editions DUNOD - Paris 1961

#### -MODELISATION

- G.L. BLOOMSBURG, R.E. RINKER (1983) : Ground-water modelling with an interactive computer.  
Field reports- Vol.21, n°2 - Ground-water - March-April 1983 , pp. 208-211.
- A.C.CHATURVEDI (1978) : Water in mining  
Cogrès SIAMOS 1978 - Granada (Espana) - L'eau dans les mines et Travaux souterrains - Vol.2 - pp.1195-1205, 3 tabl.
- P.R. DAVIS, W.C. WALTON (1982) : Factors involved in evaluating ground-water impacts of deep coal mine drainage.  
Water resorces bulletin - American water resources association - Vol.18, n°5, october 1982, pp.841,848.
- F.GHASSEMI (1974) : Etudes méthodologiques de la simulation des nappes aquifères par modèles mathématiques.  
Thèse Docteur es-sciences naturelles - Université Louis Pasteur - Strabourg 1974.
- P. LAUNAY (1981) : Programmes utilisant la méthode des éléments finis pour le calcul des écoulement hydrodynamiques souterrains en milieu saturé.  
Thèse Docteur-Ingénieur Génie Géologique et Minier - E.N.S.M. de Saint-Etienne-Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et Prospection Minière Nancy - 1981.

- V.U. NGUYEN, A.J. RAUDVIKI (1983) : Analytic solution for transient- two dimensional unconfined ground-water flow.  
*Journal des sciences hydrologiques*, 28, 2,6/1983; pp.209-219.
  
- A.S.C. OWILI-EGER, C.B. MANULA (1975) : Modelling and simulation of mine water drainage.  
*Water generator, Vol IX, september 1975 - A.P.C.O.M. 14 Int. Symp. Comput. Methods Miner.; Piladelphia; PA 1976; 21 p.; 9 ill.; 3 ref.*
  
- R.F. RUBIO, A.Y. BALLESTER (1978) : Drenaje de una mina hasta nivel constante.  
*Congrès SIAMOS 1978 - Granada (Espana) - L'eau dans les mines et les travaux souterrains , Vol.2, pp.741-749.*
  
- J.P. SCHUBERT (1978) : Reducing water leakage into underground coal-mines by aquifer dewatering.  
*Congrès SIAMOS 1978 - Granada (Espana) - L'eau dans les mines et les travaux souterrains , Vol.2, pp.911-931, 6 fig., 1 tabl.*

-CHIMIE

- P. BERTIER, J.M. BOUROCHE (1975) : Analyse de données multidimensionnelles.  
*Presses Universitaires de France 1975*
  
- T.CAIRNEY, R.C. FROST (1975) : A case study of mine water deterioration, Mainsforth colliery, County Durham.  
*Journal of hydrology*, 25 (1975) ; pp.275-293.
  
- E.N.S.M.S.E (1983) : Agressivité des eaux souterraines de la région stéphanoise vis-à-vis des bétons.  
A. CASTINEL, P.DAVOINE, R.DECHOMETS, S. RICHARD - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Houillères du Bassin de la Loire 1983.
  
- R.C. FROST (1979) : The variable iron content of mine flood water- Application for sampling and pollution control.  
*Colliery guardian International, Oct.78, pp.36-38, 5fig.*

- D.A. HACKBARTH (1979) : *The effects of surface mining of coal on water quality near Grande Cache, Alberta.*  
1979 National Research Council N°947
  
- D. HERVE (1980) : *Etude de l'acquisition d'une teneur en sulfate par les eaux stockées dans les mines de fer de Lorraine.*  
Thèse Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine - 1983.
  
- S.R. MORAN, J.A. CHERRY, E. WALLICK, C.D. PALMER (1976) : *Hydrochemical evolution of ground-water in coal bearing cretaceous and tertiary rocks of the northern plain region of North-America.*  
Alberta Research Council, Edmonto, Alberta and University of Waterloo, Waterloo Ontario
  
- J. PALYS (1968) : *Les causes du caractère aquifère varié du houiller et des venues d'eau dans les mines de haute Silesie.*  
Inst. géol., ul Bialego 5 Sosnowiec, Pologne, 7 p., 7 tableaux.
  
- H. SCHOELLER (1962) : *Les eaux souterraines.*  
Paris, Masson, 1962, 1 Volume, 642 pages.
  
- S.C. TURBAK, G.J. OLSON, G.A. McFETERS (1979) : *Impact of western coal mining - Chemical investigations of a surface coal mine sedimentation pond.*  
Water research, Vol.13, pp.1023-1031, 4 fig., 35 ref.

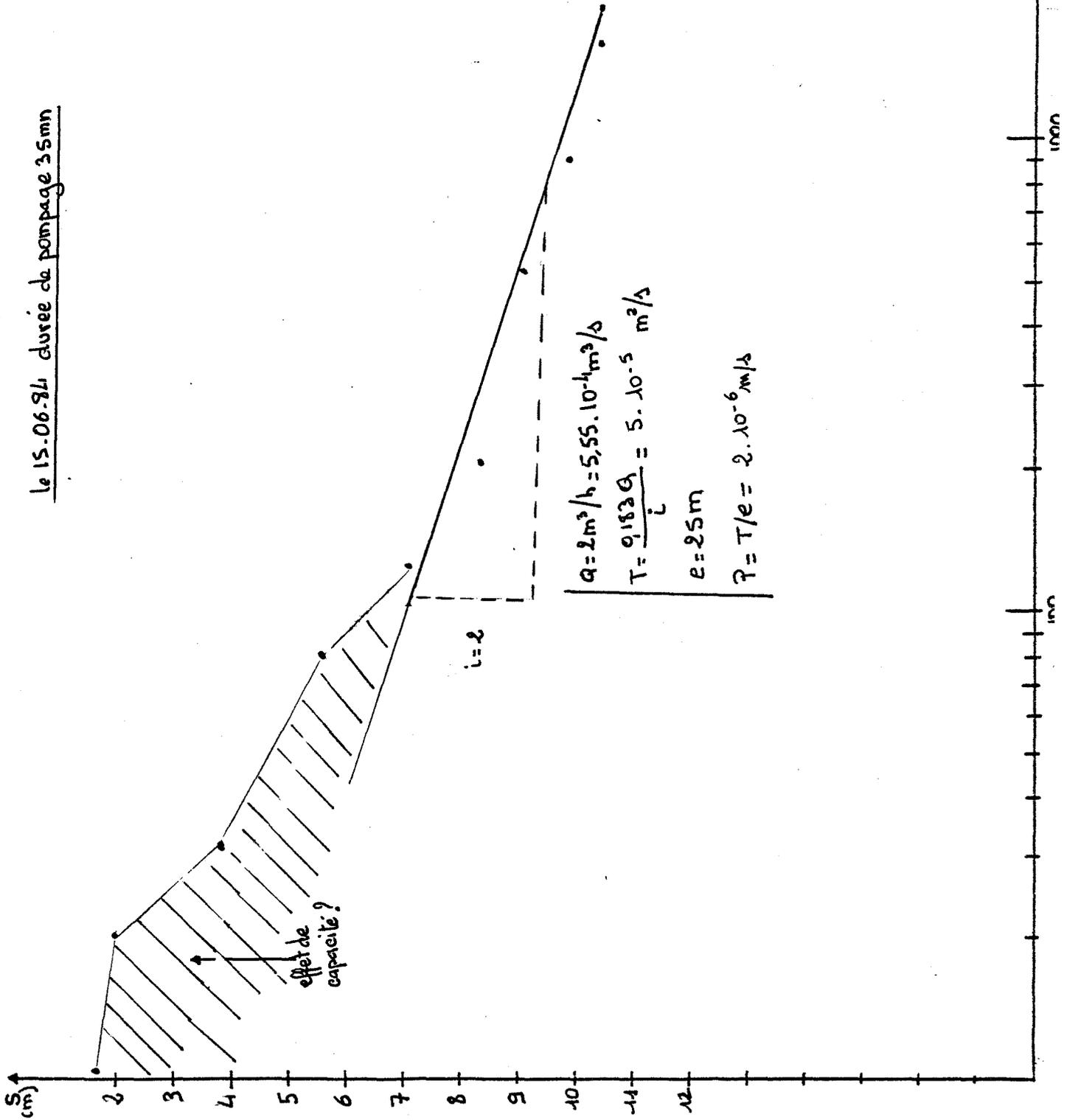
## **ANNEXES**

ANNEXE N°2

RESULTATS DES ESSAIS PAR POMPAGE  
DANS LES PIEZOMETRES

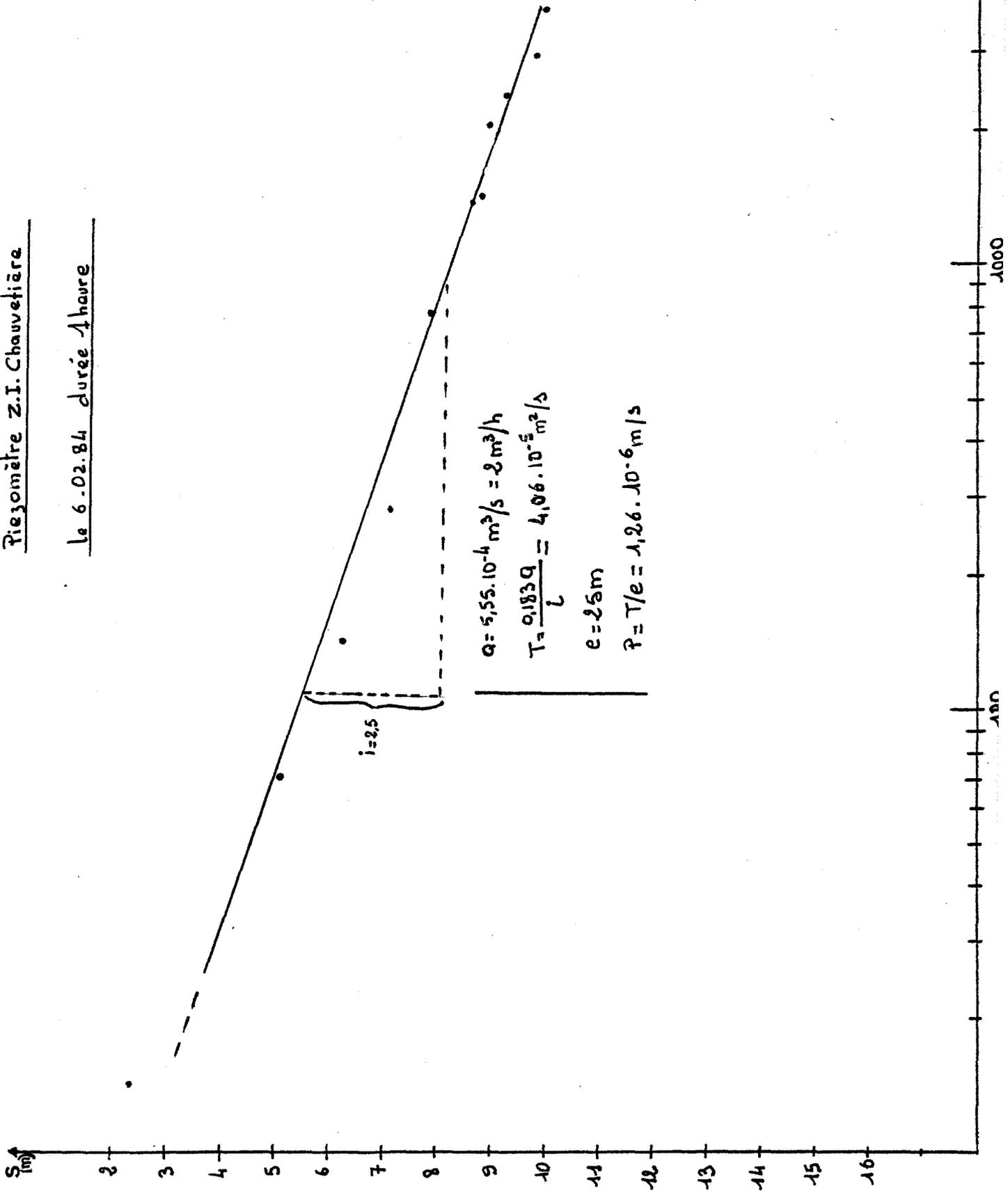
Piezomètre Z.I. Chauvetière

le 15.06.84 durée de pompage 35mn



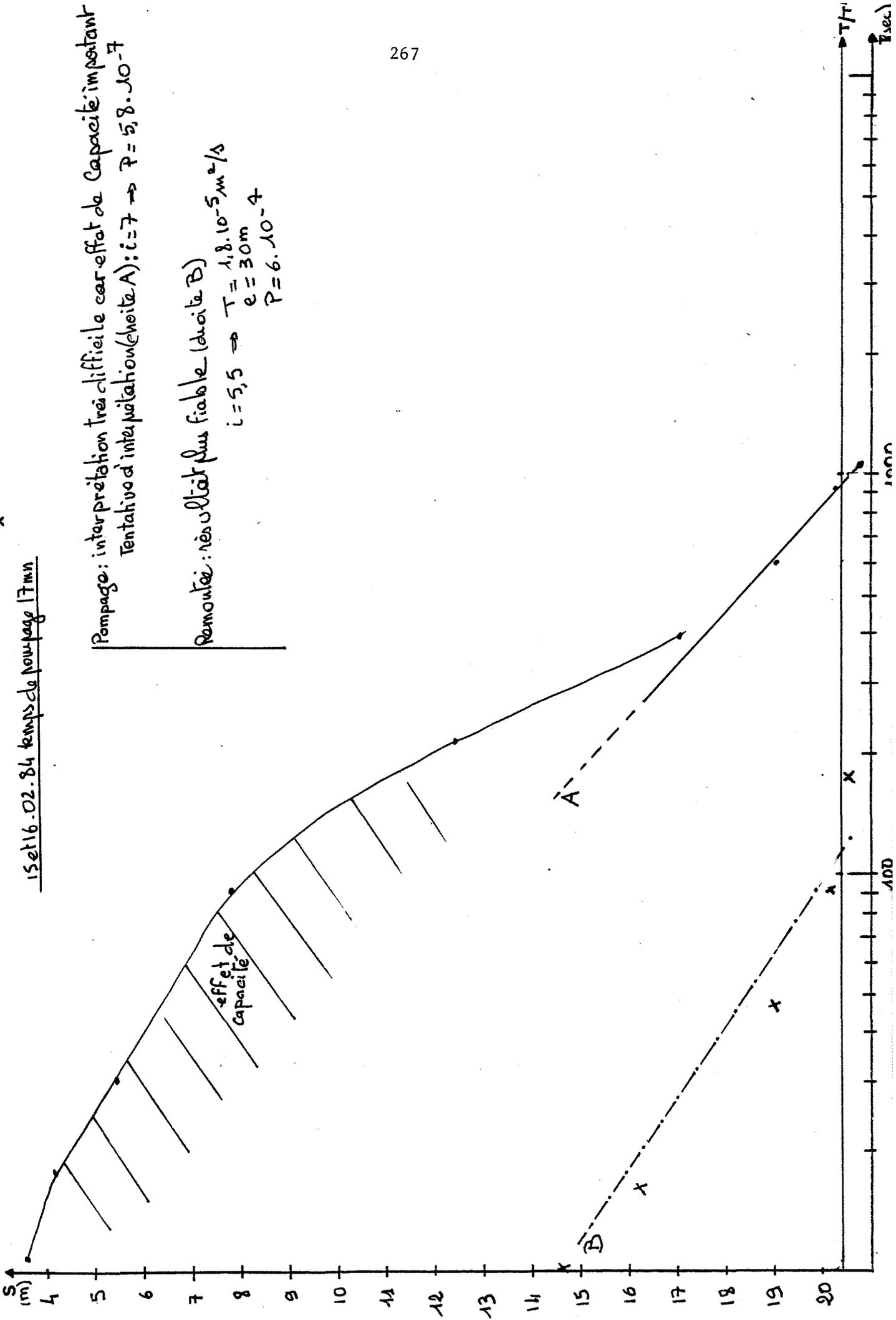
Piezomètre Z.I. Chauvetière

le 6.02.84 durée 1 heure



Piézomètre Gare de Firminy

15 et 16.02.84 temps de pompage 17mn



Pompage: interprétation très difficile car effet de Capacité important  
Tentative d'interprétation (choix A):  $i = 7 \rightarrow P = 5,8 \cdot 10^{-7}$

Remontée: résultat plus fiable (choix B)

$$i = 5,5 \Rightarrow T = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$e = 30 \text{ m}$$

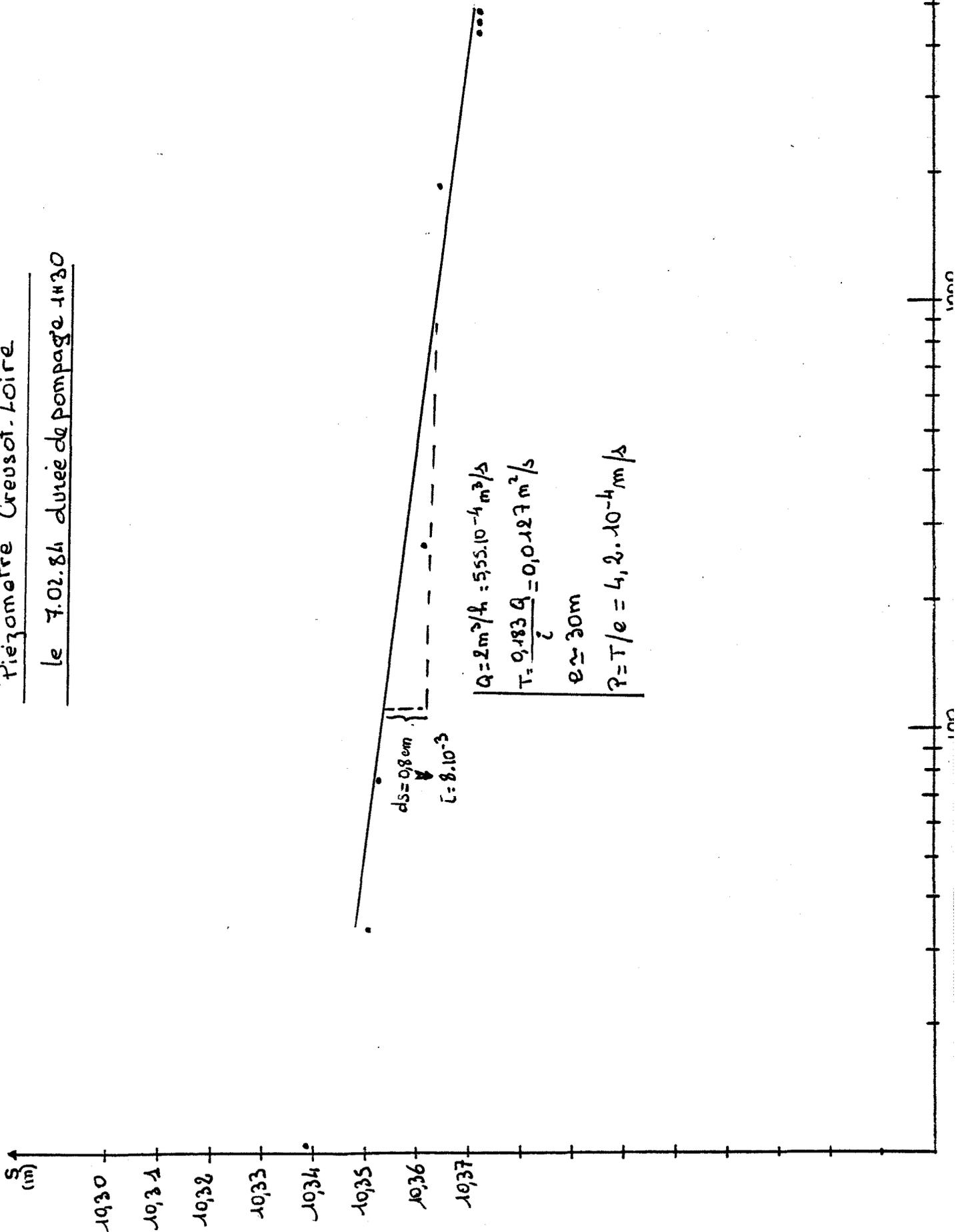
$$P = 6 \cdot 10^{-4}$$

$T$  (min)

ADD

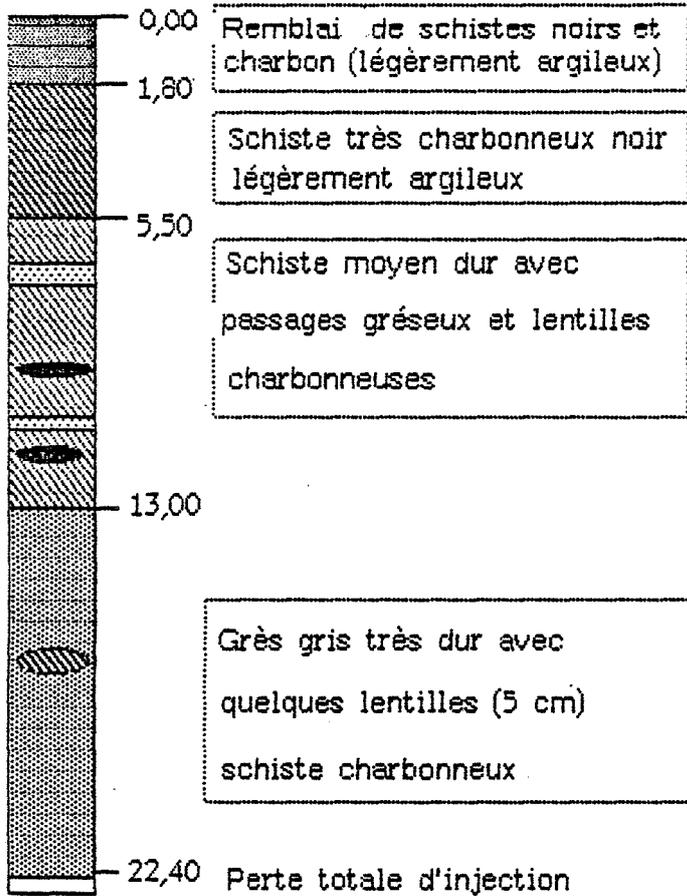
S (m)

Piezomètre Creusot-Loire  
le 7.02.84 durée de pompage 1h30

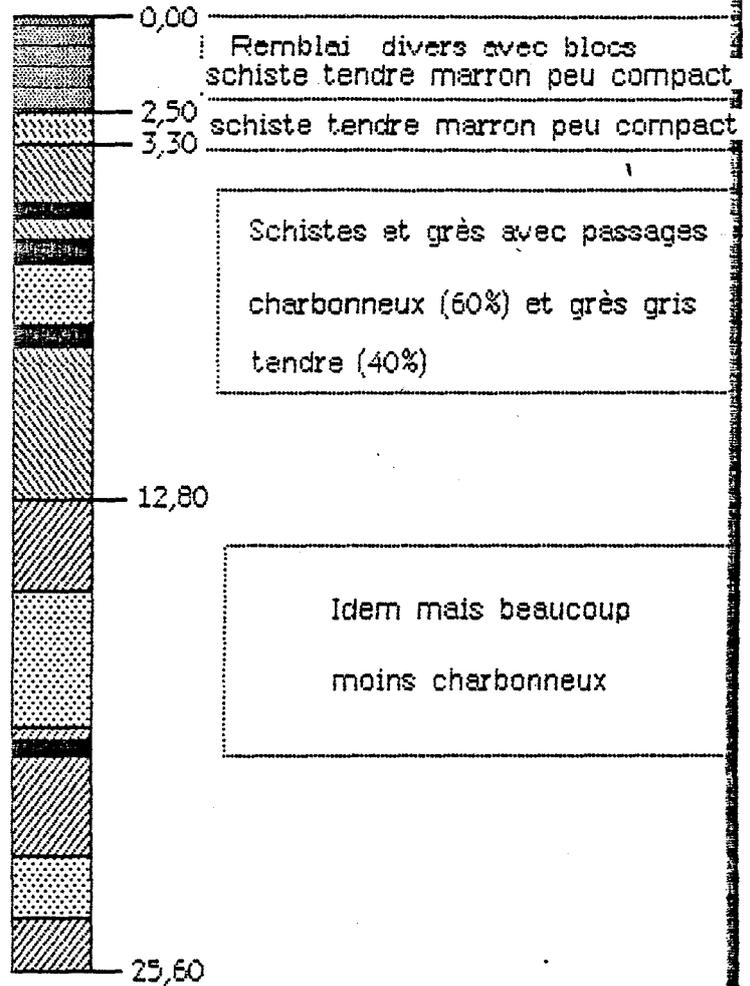


ANNEXE N°3

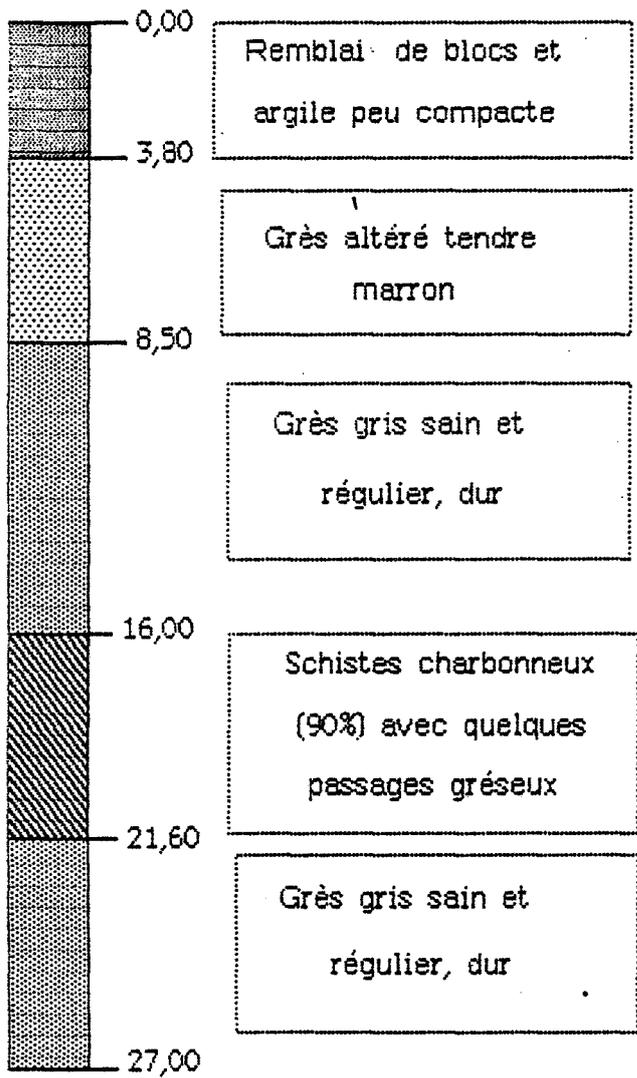
COUPE GEOLOGIQUE DES PIEZOMETRES



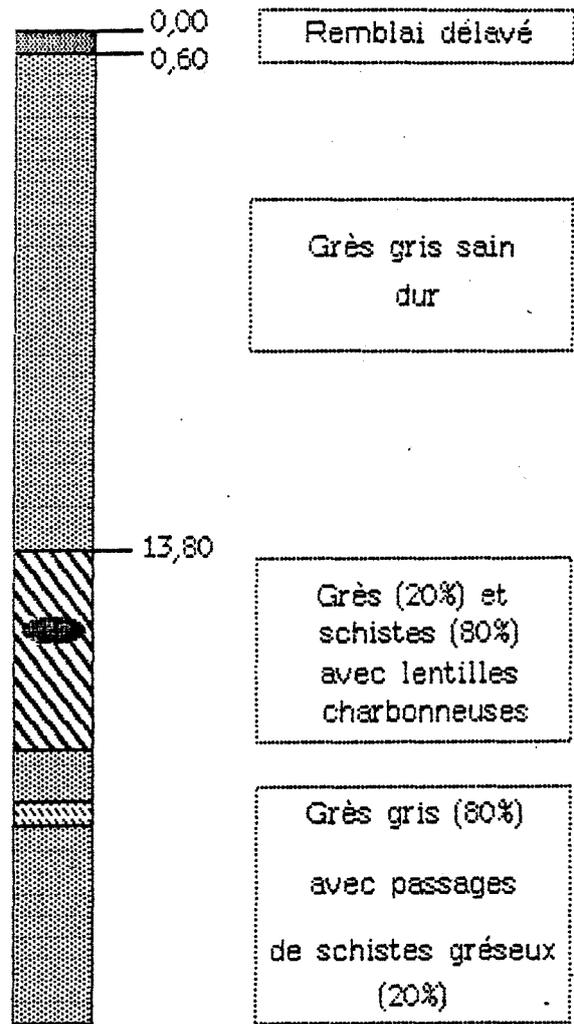
PIEZOMETRE CREUSOT-LOIRE



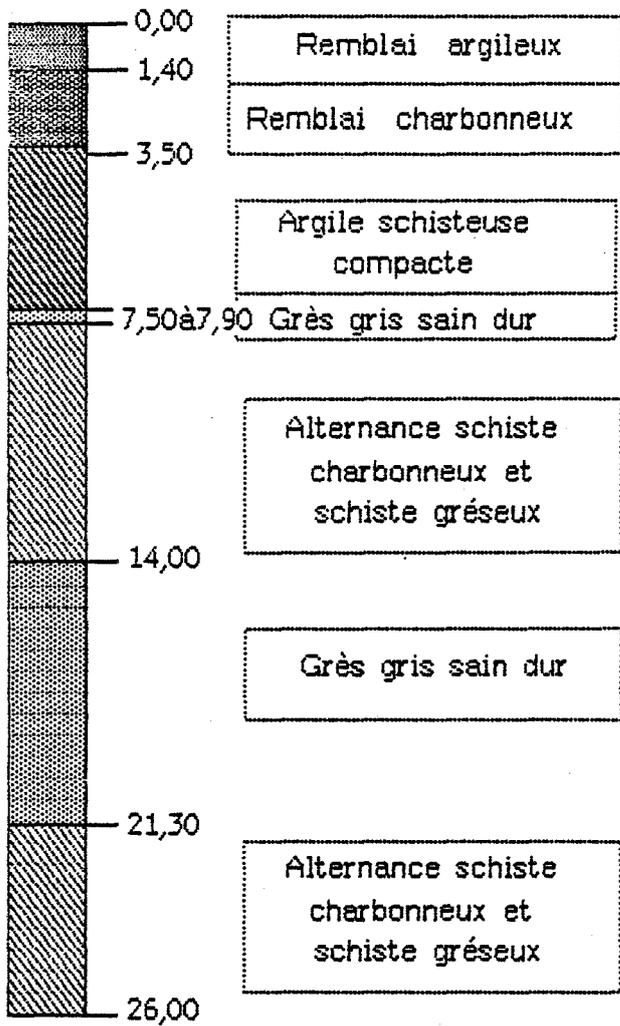
PIEZOMETRE GARE DE FIRMINY



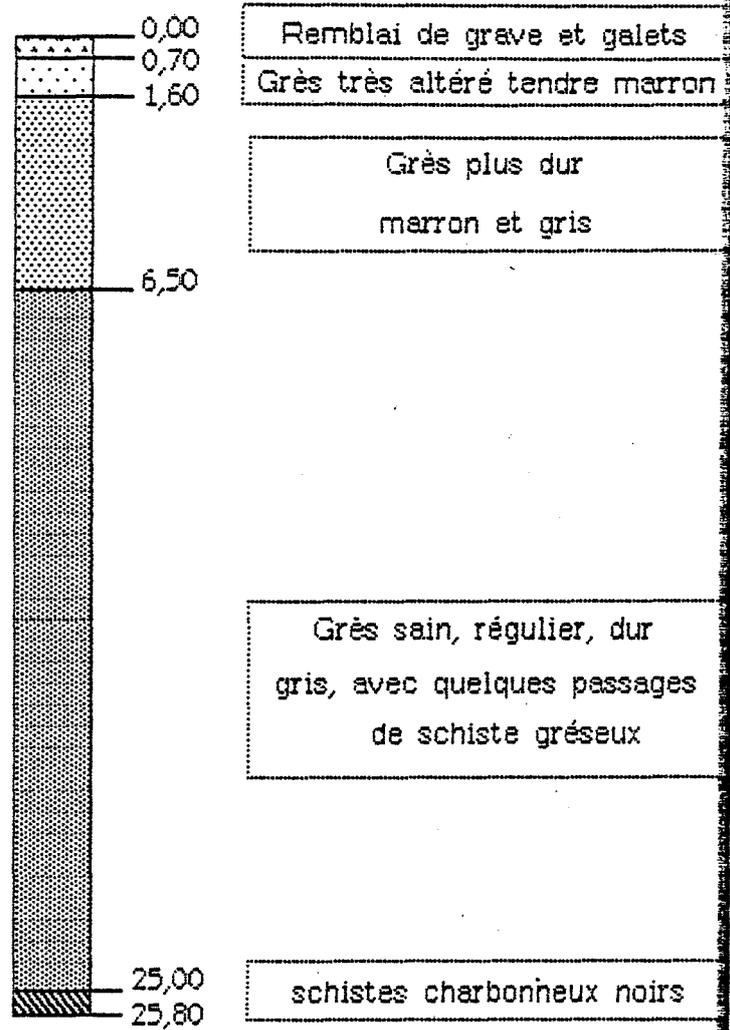
PIEZOMETRE IMPASSE DU LAVOIR



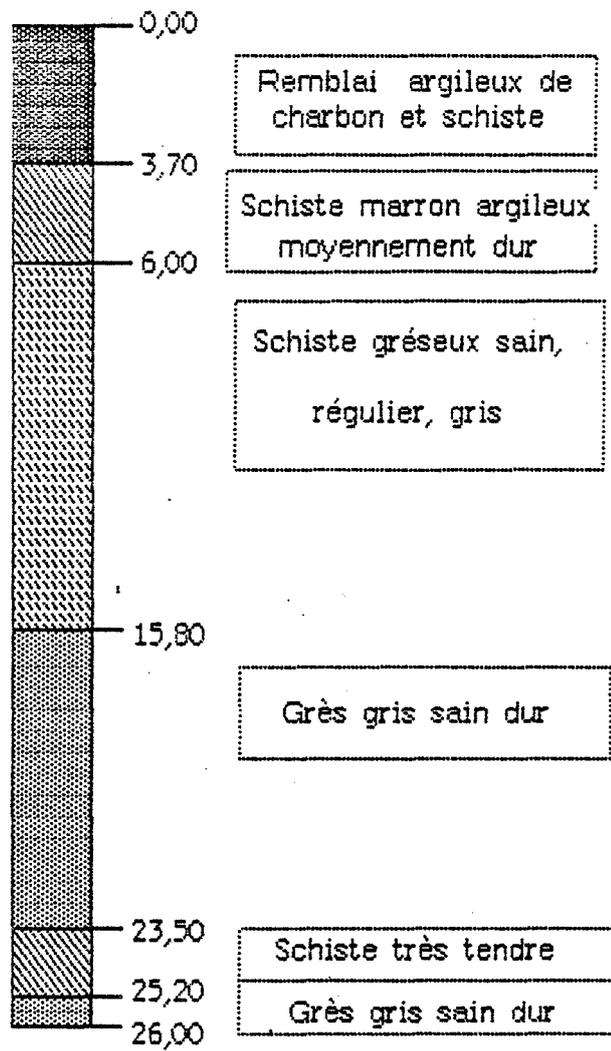
PIEZOMETRE TUNNEL SNCF



PIEZOMETRE CITE DELAYNAUD



PIEZOMETRE Z.I. CHAUVETIERE



**PIEZOMETRE PLACE BELLEVUE**

ANNEXE N°4

ARRETE PREFECTORAL RELATIF AU SUIVI  
DE LA REMONTEE DES EAUX DANS LES TRAVAUX

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFECTURE DE LA LOIRE

42022 St ETIENNE CEDEX

TÉLÉPHONE : (77) 33-42-45

DIRECTION DE L'ADMINISTRATION GÉNÉRALE  
ET DE LA RÉGLEMENTATION

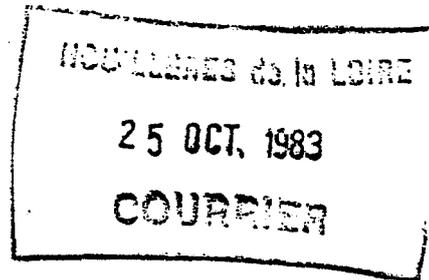
BUREAU DE L'ENVIRONNEMENT

Poste Téléphonique intérieur

à appeler : 41.20

ME/MK

Le 24 OCT. 1983



Monsieur le Directeur,

Vous avez déposé dans mes services le 26 mai dernier une déclaration de délaissement des travaux de fond concernant les secteurs "Montrambert, Varenne, Combe et Berlan".

J'ai l'honneur de vous adresser ci-joint l'ampliation de mon arrêté fixant les travaux liés au délaissement, qu'il vous appartient d'exécuter.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Directeur, l'assurance de ma considération distinguée.

Pour le Préfet,  
Commissaire de la République  
et par délégation  
Le Directeur

Michel BOURLIER

Monsieur le Directeur  
Houillères de la Loire  
Avenue Benoit Charvet  
P. 504

007 - SAINT-ETIENNE CEDEX

PRÉFECTURE DE LA LOIRE

42022 St ETIENNE CEDEX

TÉLÉPHONE : (77) 33-42-45

DIRECTION DE L'ADMINISTRATION GÉNÉRALE  
ET DE LA RÉGLEMENTATION

BUREAU DE L'ENVIRONNEMENT

Le Préfet, Commissaire de la République  
du Département de la Loire

Chevalier de la Légion d'Honneur,

Poste Téléphonique intérieur  
à appeler : 41.22

BM/MK

VU le Code Minier et l'ensemble des textes pris pour son application,

VU le décret n° 80.330 du 7 mai 1980, relatif à la Police des Mines et des Carrières,

VU la déclaration de délaissement des travaux du fond et des ouvrages s'y rattachant, déposée le 26 mai 1983 par les Houillères de la Loire,

VU l'arrêté préfectoral du 25 juillet 1983 relatif au sursis à statuer sur la déclaration précitée et à la consultation des élus et des services intéressés,

VU les avis exprimés au cours de l'instruction réglementaire,

VU les rapports et avis des Ingénieurs de la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche en date des 4 juillet 1983, 26 septembre 1983 et 20 octobre 1983,

SUR proposition du Secrétaire général de la Préfecture,

A R R E T E

ARTICLE 1er. - Dans le cadre de l'arrêt des travaux de fond des Houillères de la Loire sur les secteurs de MONTRAMBERT, VARENNE, des COMBES et BERLAN ainsi que des ouvrages rattachés débouchant en surface, les travaux à exécuter par l'exploitant et liés au délaissement sont précisés aux articles ci-après, sans préjudice de l'observation des lois et règlements applicables et des mesures particulières de police présentées en application de l'article 84 du Code Minier.

ARTICLE 2. - Sous réserve du respect des prescriptions édictées dans les articles ci-après, les mesures prises ou prévues notamment pour la protection du site et des lieux affectés par l'exploitation du gisement, devront être conformes au dossier annexé à la déclaration de délaissement.

En particulier pour faciliter le passage des eaux d'un bassin à l'autre, seront effectués les travaux suivants :

- Secteur MONTRAMBERT : Démolition du barrage au plâtre situé dans le travers bancs Bouchage - 320
- Secteur VARENNE : Démolition des barrages légers des cotes - 136 + 11 et ouverture après vidange du serrement de la cote : 100.

- Secteur du puits DES COMBES -

Vidange des eaux stockées derrière le serrement de la cote + 355 et coupure des tuyauteries traversant le serrement.

Article 3 : Installations de surface - Terrils -

Les installations de surface liées aux ouvrages délaissés, <sup>et les terrils</sup> ne sont pas visées par la déclaration de délaissement du 26 mai 1983.

Les installations, tout comme les travaux délaissés, restent soumises à la police des Mines.

Article 4 - Mine - Fond -

4.1 Arrêt de l'exhaure : l'arrêt de l'exhaure à partir du niveau - 320 ne pourra intervenir qu'à la fin des travaux du fond.

4.2 Piézomètres : Afin de pouvoir prévenir tout incident dû à la remontée des eaux et aux fins de connaissance de la nappe phréatique des piézomètres seront mis en place, dès à présent, dans les secteurs présumés concernés à savoir :

- secteur FIRMINY :

- . un à proximité du souterrain de l'autoroute
- . un autre près de l'Ondaine en limite de la commune d'Unieux cote 456
- . un troisième près de l'Ondaine à proximité de l'aciérie Creusot Loire (Division de la Tour)

- secteur LA RICAMARIE au lieu dit "Au Mas" cote 558

- secteur SAINT ETIENNE :

- . Un au lieu dit "La Chauvetière" cote 580
- . Un autre à Bellevue cote 563

Ces piézomètres auront un diamètre tel que des prélèvements et des mesures de niveau d'eau puissent être effectués facilement. Ils auront une profondeur minimale de 25 m par rapport au sol naturel.

Dès leur réalisation un descriptif de ces ouvrages précisant leur emplacement exact sera transmis à la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche.

4.3 Stations de pompage : En vue de maîtriser la remontée des eaux, pour éviter d'éventuels désordres en surface, trois stations d'exhaure seront installées, ou maintenues, aux puits du Marais (Montrambert des Combes (Montrambert) et du Marais (Varenne).

- Le débit des pompes installées sera directement fonction du débit prévisible d'eau à exhauser afin de maintenir le niveau de la nappe à l'altitude voulue et ce, avec une marche des pompes de 20H par jour au maximum.

- L'installation des stations de pompage se fera dans les délais tels que leur mise en route puisse intervenir dès qu'une remontée sensible des eaux minières sera détectée dans le piézomètre de contrôle concernant la zone en cause et au plus tard lorsque l'eau atteindra :

- . La cote 540 pour le puits des Combes;
- . Une cote restant à définir pour le puits du Marais (Montrambert) et ce, en fonction d'une étude hydrogéologique de la remontée des eaux, sans pour autant dépasser l'altitude 450.

En tout état de cause, ces pompages devront être tels que:

- 1) tout risque d'inondation soit évité dans les zones basses (en particulier zones urbanisées, aux lieudits La Malafolie, Au Mas, Bellevue, dans les vallées de l'Egotay et du Pêchier) et au niveau du tunnel SNCF de la ligne SAINT ETIENNE - SAINT GEORGES D'AURAC.
  - 2) Les fondations d'immeubles sur puits profonds et les réseaux d'assainissement ne subissent pas de corrosions inacceptables (test d'agressivité) et ne soient pas amenés, pour ces derniers, dans la mesure du possible, à drainer des "eaux minières".
- Le démantèlement des stations de pompage ne pourra intervenir que sur le vu d'une étude hydrogéologique spécifique du secteur concerné prenant en compte les résultats de la remontée des eaux, dans la mesure où l'on aura atteint un régime "stable" sur un an de temps, au minimum, et que les travaux concernant la canalisation et le traitement éventuels des rejets seront réalisés. (solution "définitive" du traitement des rejets). Dans la mesure où des ouvrages en béton seraient concernés par le niveau des eaux ainsi atteint, une étude démontrant la non agressivité des eaux minières vis à vis de ces ouvrages devra être faite. A défaut des dispositions adéquates seront prises.

#### 4.4 Surveillance de la montée des eaux -

- Dès l'arrêt de l'exhaure, la montée des eaux dans les travaux miniers sera surveillée de manière hebdomadaire à partir de cinq puits conservés à cette fin (puits du Marais et des Combes - secteur Montrambert, puits des Granges, de la Chana et du Marais secteur Varenne) et au niveau de chacun des six piézomètres. Les travaux de nivellement éventuels, afin de coter de manière précise l'ensemble de ces points, devront être assurés dès que les résultats de la campagne de l'I.G.N., actuellement en cours, seront connus. En cas d'anomalies et lorsque l'on se rapprochera à moins de 10 m d'altitudes présumées délicates pour les résurgences possibles, ce contrôle sera effectué au moins de façon bihebdomadaire.
- Un état prévisionnel mensuel de la remontée des eaux sera établi et corrigé en fonction des résultats obtenus.

- Le résultat de ces mesures sera reporté sur un registre : une courbe d'évolution sera tracée en parallèle avec la pluviométrie ; les altitudes "délicates" pour les résurgences possibles y seront notées ainsi que la ou les zones présumées concernées.

#### 4.5.- Recollement - étude hydrogéologique

L'étude hydrogéologique engagée, sera poursuivie : elle s'appuiera en particulier sur les résultats des contrôles de remontée de la nappe, des analyses d'eau effectuées et des résurgences constatées.

Pour chaque zone et à chaque évènement important (stabilisation du niveau - anomalie constatée dans un puits de contrôle ou un piézomètre - variation des caractéristiques chimiques de l'eau - résurgences etc...) une note d'interprétation sera établie.

#### 4.6.- Essais de remontée des eaux

Tout essai de remontée des eaux au-dessus des cotes prévues de stabilisation de la nappe, (cote 500 pour le puits du Marais (Roche) cote 540 pour le puits des Combes - cote 450 pour le puits du Marais (Montrambert), fera l'objet avant sa réalisation d'une étude spécifique précisant en particulier :

- les points de résurgences possibles compte tenu des niveaux d'eau qui pourront être atteints,
- les vieux travaux débouchant au jour qui pourraient être concernés,
- les dispositions particulières mises en place - (visites et contrôles rapprochés - piézomètre de contrôle, en particulier au niveau du tunnel SNCF de la Croix de l'Orme, le niveau supérieur des eaux devant rester, pour cet ouvrage, en tout point inférieur d'un mètre au point le plus bas du réseau d'évacuation des eaux et des fondations - remontée progressive des eaux).
- les moyens de pompage en service et éventuellement supplémentaires, les délais de mise en service et les effets prévisibles,
- les études envisagées sur l'agressivité éventuelle des eaux minières vis à vis des bétons.

#### 4.7.- Contrôle des eaux

##### a) Avant arrêt de l'exhaure -

- Les renseignements disponibles sur chaque venue d'eau importante des différents bassins seront rassemblés (débit, température, variations). sur chacune de ces venues d'eau seront effectuées des mesures et analyses permettant de déterminer au minimum les paramètres suivants:

Débit, température, pH, teneur en extrait sec - tH - TAC - Ca - Mg - Fe - Mn - Na - SO4 - Cl - HCO3 - CO2 -

...../.....

- outre les données ci-dessus, il sera rassemblé, pour les rivières et points d'eau susceptibles d'être concernés par une ressurgence, les paramètres suivants : oxygène dissous - résistivité - MES - DBO - DCO. Si ces données n'existent pas des mesures et des prélèvements suivis d'analyses seront effectués.

b) Après arrêt de l'exhaure :

- les analyses prévues ci-dessus seront effectuées dans chacun des 5 puits de contrôle cités en 4-4 au cours de la remontée des eaux lorsque celles-ci atteindront un niveau situé à 50 m au-dessous de la cote des exutoires potentiels de chacun des bassins ou lorsqu'elles se stabiliseront.
- des prélèvements avec analyses permettant de déterminer les paramètres cités en a) ci-dessus (à l'exception des MES - DBO - DCO qui seront déterminés de manière annuelle) seront effectués, par pompage, tous les 6 mois, au fond des 6 piézomètres mis en place; cette périodicité devra être réduite au mois, ou même à la semaine, en cas d'anomalie ou de niveau d'eau élevé.

Les conditions de prélèvement pour chaque piézomètre seront fixées par une consigne qui sera communiquée à la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche.

c) Sur les pompages et résurgences

Les eaux rejetées dans le milieu naturel soit par pompage, soit naturellement par le biais des ressurgences canalisées feront l'objet d'un contrôle mensuel; les paramètres suivis étant ceux précisés en a) ci-dessus (à l'exception des MES - DBO - DCO qui seront déterminés de manière annuelle).

L'ensemble de ces résultats sera reporté sur des tableaux, certaines caractéristiques (le débit en particulier) feront l'objet d'un suivi par graphique.

Un état récapitulatif annuel sera établi.

4.8 Zones de ressurgence - Vieux travaux -

a) surveillance des zones de ressurgence -

Pendant la première année qui suivra l'arrêt de l'exhaure les zones de ressurgence possible feront l'objet d'une visite de surveillance trimestrielle afin :

- . de connaître le régime et les variations saisonnières du débit des venues d'eau dans ces zones.
- . de détecter tout débouché de vieux travaux miniers en surface. Pour faciliter cette détection un état des vieux travaux connus avec report sur un plan de surface sera dressé.

Jusqu'à ce que les eaux atteignent un niveau situé 50 m en-dessous des exutoires potentiels de chacun des bassins, les visites de surveillance pourront être annuelles.

Dès que le niveau susvisé sera atteint les visites de surveillance deviendront bimensuelles, et le resteront jusqu'à obtention d'une situation stable. Ensuite, la surveillance des zones de ressurgence sera assurée par une visite mensuelle des lieux pendant au moins un an (à l'occasion, en particulier de fortes précipitations) puis, la périodicité des visites pourra, être portée à un an, si aucune anomalie n'est constatée. Les décharges et les vieux travaux seront en particulier visés.

En cas d'anomalie constatée, les visites mensuelles seront rétablies et maintenues pendant une année au moins après traitement de l'incident ayant amené l'anomalie.

Un procès-verbal de visite sera systématiquement établi et archivé.

#### b) Traitement des ressurgences -

Dès qu'une ressurgence aura été repérée son exutoire sera aménagé et les eaux éventuellement traitées si leurs caractéristiques ne permettent pas leur rejet direct en milieu naturel. Le raccordement au milieu naturel de ces eaux devra être assuré, dans la mesure du possible, sans utilisation des réseaux d'assainissement communaux.

#### 4.9 Remblayage des puits -

Toute disposition sera prise lors du remblayage des ouvrages débouchant au jour pour éviter la formation de zones de faible compacité et préserver le soutènement existant de ces ouvrages.

Le tonnage des matériaux de remblayage utilisés pour chaque ouvrage sera comptabilisé. Le niveau des remblais sera mesuré au moins deux fois en cours de remblaiement, lorsque les niveaux théoriques prévus se situeront à 300 et 100 m de l'orifice du puits et ce, afin de vérifier la correspondance entre volumes théoriques et volumes réels mis en place. Une fiche de résultat sera établie pour chaque ouvrage.

Ces travaux devront être effectués sous un délai d'un an à compter de l'arrêt de l'exploitation. Pour le puits Flotard ce délai est reporté à fin 1988.

La surveillance des tassements des remblais dans les puits sera assurée de manière mensuelle pendant un an, puis ensuite tous les trois mois et ce, pendant une période qui excèdera d'un an le dernier tassement constaté et sous réserve de la stabilisation du niveau d'eau dans les travaux. Un compte rendu de visite sera établi systématiquement.

Cette période de surveillance étant assurée l'orifice des puits sera obturé par une dalle en béton muni d'un regard. La surveillance des lieux pourra alors être limitée à une visite annuelle.

#### 4.10 Autres ouvrages miniers souterrains -

Les autres ouvrages ou vides miniers qui ne sont pas utilisés pour la surveillance ou le rejet des eaux, et situés à moins de

20 mètres de la surface seront remblayés.

4.11- Puits préservés

Les cinq puits non remblayés, aux fins d'observation de la remontée des eaux, feront l'objet d'une surveillance annuelle afin de s'assurer de leur pérennité (un compte rendu sera établi) leur orifice sera obturé par un plancher métallique, ou une dalle bétonnée, suffisamment étanche pour interdire le passage d'une personne (adulte ou enfant) et dont tous les éléments amovibles seront verrouillés.

A terme et dans le cadre de l'adoption d'une solution "définitive" un traitement de ces ouvrages sera proposé, en fonction en particulier des résultats de l'étude de la remontée des eaux.

4.12- Les notes et compte rendus, les résultats des contrôles, mesures analyses et états prévus aux paragraphes 4.4 à 4.12 ci-avant devront être transmis selon le cas de manière mensuelle ou annuelle et en double exemplaires à la Direction régionale de l'Industrie et de la Recherche. L'état récapitulatif annuel visé au point 4.7 sera communiqué pour ce qui les concerne à la Direction départementale de l'Equipement (rejets rejoignant l'Ondaine) à la Direction départementale de l'Agriculture (rejets rejoignant le Lizeron et à la Direction départementale de l'Action Sanitaire et Sociale.

ARTICLE 5.- Révisions

Les dispositions prévues par le présent arrêté pourront être revues à la demande des Houillères de la Loire, une fois qu'une situation stable et pérenne sera obtenue sur un ou plusieurs secteurs.

ARTICLE 6.- M. le Secrétaire général de la Loire et M. le Directeur régional de l'Industrie et de la Recherche sont chargés, chacun en ce qui le concerne de l'exécution du présent arrêté.

FAIT à SAINT-ETIENNE, le 24 OCT. 1983

Ampliation adressée à :

- Monsieur le Directeur des  
Houillères de la Loire  
9, avenue Benoit Charvet  
B.P. 504  
42 007 - SAINTE-ETIENNE CEDEX

**JEAN DOMINE**

Pour le Secrétaire Général  
et par délégation  
L'Attaché de Préfecture,  
Chef de Bureau



M. ESSOT

ANNEXE N°5

REFLEXION SUR LA MISE EN PLACE D'UN  
SYSTEME D'INTERPRETATION DES DONNEES  
RELATIVES AU DOSSIER DE DELAISSEMENT  
DES HOUILLERES DU BASSIN DE LA LOIRE

PROPOSITIONS DE MISE EN PLACE D'UN SYSTEME D'INTERPRETATIONDES DONNEES RELATIVES AU DOSSIER DE DELAISSEMENT (H. B. L.)I - INTRODUCTION

Suite à la cessation des exploitations souterraines dans les vallées de l'ONDAINE et du LIZERON, les Houillères du Bassin de la LOIRE communiquent chaque mois à divers organismes des dossiers contenant différentes données.

Ces dossiers concernent la remontée du niveau de l'eau dans les différentes concessions ainsi que le suivi piézométrique et chimique des différents piézomètres.

L'interprétation de ces différentes données peut permettre d'acquérir une connaissance plus approfondie de l'aquifère que constitue la mine. Elle peut aussi permettre de prévoir, à long terme le temps de remontée, et de définir l'influence qualitative de la nappe profonde sur les nappes superficielles.

II - PIEZOMETRES

Sept piézomètres ont été implantés sur le secteur d'étude, dans le but de suivre la remontée de l'aquifère "minier" dans les derniers mètres précédant l'émergence dans les zones vulnérables.

Cependant, la présence d'eau dans tous ces ouvrages dès leur implantation rend impossible le suivi de la remontée par des mesures piézométriques. Il a donc été décidé de déceler la présence de la nappe profonde dans les terrains superficiels par son impact chimique sur la qualité de l'eau.

II-1 - Les données disponibles

- . Suivi piézométrique hebdomadaire
- . Suivi pluviométrique journalier
- . Analyses chimiques bisannuelles.

## II-2 - Les principaux paramètres à suivre

Une étude chimique de la qualité des eaux superficielles et des eaux profondes des vallées de l'ONDAINE et du LIZERON a permis de déterminer les paramètres chimiques qui peuvent être utilisés comme "marqueurs" de différenciation entre une eau superficielle d'une eau profonde.

Nous proposons donc de baser la surveillance sur les éléments suivants :

- $\text{HCO}_3^-$
- $\frac{r \text{ Na}}{r \text{ Ca} + r \text{ Mg}}$
- $\text{SO}_4$
- $\frac{r \text{ Ca}}{r \text{ Mg}}$

Cependant, le caractère d'une eau superficielle dépend très probablement de la pluviométrie précédant le prélèvement, de la saison, et de la piézométrie dépendant elle-même de la pluviométrie et de divers autres facteurs.

## II-3 - Proposition d'un modèle de suivi

\* On pourra dans un premier temps tenter de trouver la corrélation existant entre la piézométrie et la pluviométrie, à savoir :

- Est-ce le seul facteur d'influence ?

Il semble que pour les piézomètres étudiés, tant que la nappe profonde n'a pas rejoint la surface, la pluviométrie soit le seul facteur d'influence sur la piézométrie. Cependant, pour deux de ces piézomètres (CREUSOT-LOIRE et Z. I. CHAUVETIERE) on peut penser que la remontée du niveau de l'eau est terminée et se traduit par l'existence d'une émergence dont on tentera de définir l'influence sur la piézométrie. De même, les pompages effectués par l'usine CREUSOT-LOIRE seront un facteur supplémentaire à introduire dans l'étude du piézomètre CREUSOT-LOIRE.

- . Quel est l'écart temporel entre les précipitations et la réaction de la nappe ?
- . Existe-t-il une saisonnalité ?

La réponse à ces questions devrait permettre de définir pour chaque piézomètre une réaction typique piézométrie-pluviométrie comportant les éléments suivants :

- . Saisonnalité (pluviométrie sur 3 mois)
- . Précipitation minimale en un temps donné entraînant une réaction mesurable de la piézométrie.
- . Temps de réaction.

Ces mesures faites sur plusieurs années permettront de déceler tout changement de comportement lié et la présence de la nappe "minièrè" en surface.

\* Les résultats de cette première investigation qui aura été faite avec un pas de temps d'une semaine permettront ensuite une interprétation plus fine des analyses chimiques bisannuelles.

On pourra notamment tenter de définir les relations existant entre la pluviométrie, la saisonnalité et les différents paramètres chimiques retenus

$$(SO_4^{--}, HCO_3^{--}, \frac{r Na}{rCa + rMg}, \frac{r Ca}{r Mg})$$

\* Pour toutes ces études, différents outils sont à notre disposition :

- . Logiciel Multiplan (traitement de tableau)
- . Méthode des déviations résiduelles
- . Analyse en composantes principales
- . Etc...

Il sera, dans un premier temps, nécessaire de juger de la faisabilité de l'étude, puis définir quels sont les outils les plus adaptés à une gestion simple des données.

### III - PUIITS DE MINE

De même, une étude pourra être menée sur le suivi piézométrique dans les puits de mine, afin d'approfondir la connaissance du milieu.

Ceci dans le but de permettre une prévision ultérieure de la remontée du niveau de l'eau dans le cas des mines de la LOIRE ou dans tout autre cas.

En effet, la remontée du niveau de l'eau semble relativement linéaire en fonction du temps, les irrégularités de la courbe peuvent alors être interprétées comme des réponses à différents facteurs.

#### III-1 - Données disponibles sur les vallées de l'ONDAINE et du LIZERON

- . Suivi piézométrique hebdomadaire
- . Suivi pluviométrique journalier
- . Profondeur de l'eau par rapport à la surface
- . Principaux niveaux de travaux.

#### III-2 - Données difficilement accessibles sur les vallées de l'ONDAINE et du LIZERON

Les données difficilement accessibles sont celles concernant l'importance des travaux et le volume des vides qui en résultent.

#### III-3 - Etude proposée

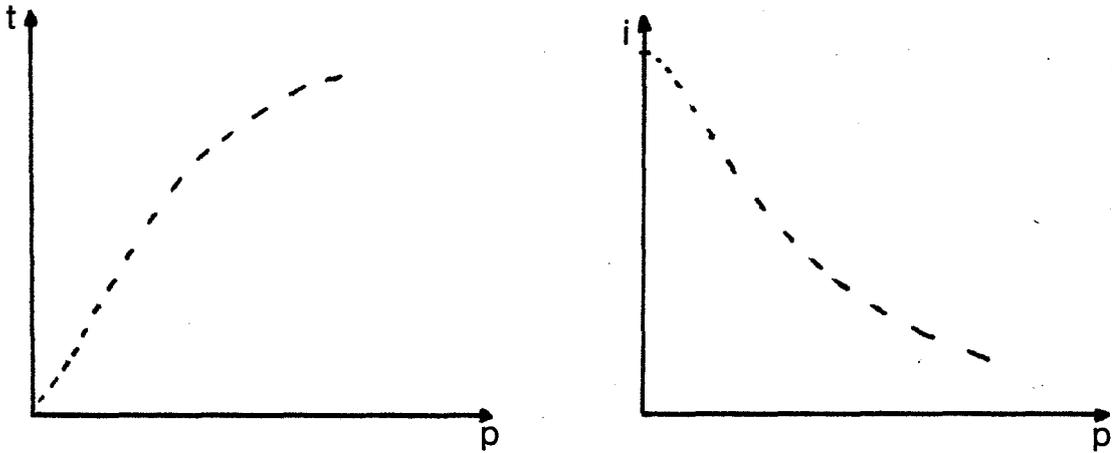
On pourra tenter de faire ressortir l'influence des principaux facteurs sur les variations de la vitesse de remontée, à savoir :

- . La pluviométrie
- . La profondeur par rapport à la surface :

Le temps de réponse à une précipitation, et l'intensité de la réponse dépendent directement de ce facteur, il serait intéressant de définir l'allure des fonctions :

- temps de réponse :  $f$  (profondeur)
- Intensité de réponse :  $f$  (profondeur)

On peut penser que ces fonctions varient en sens inverse :



- . La saisonnalité
- . L'intensité des travaux.

Pour le cas des mines de la LOIRE, ce facteur est le facteur résiduel qui pourra être considéré comme responsable de toute variation de la vitesse de remontée non expliquée.

**ANNEXE N°6**

**FICHES ANALYTIQUES DES ECHANTILLONS  
D'EAU PRELEVES POUR LE "POINT ZERO"**

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : MERDANT

COMMUNE : LA RICAMARIE

CONCESSION OU DIVISION : LA BERAUDIÈRE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Confluence du MERDANT avec l'ONDENON, parking du gymnase

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 9h30

TEMPERATURE : 12,1°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
7,00	570	6,4	3,85	18,4	5,90	1,15	0,15	62,0	61,6	58,5	234,9	0	148	555	235	4,2	1500

## DESCRIPTION :

La caractéristique principale de cette eau réside dans sa DCO supérieure à 200 ainsi que dans son rapport  $\frac{DCO}{DBO}$  proche de 2 ; deux valeurs typiques d'un effluent d'origine domestique. En effet le Merdant canalisé est utilisé comme collecteur principal des eaux usées du quartier ; l'échantillon ayant été prélevé en dehors des heures d'exhaure du puits des combes et en période d'étiage prononcé, c'est essentiellement le caractère eaux usées qui ressort (l'absence de CO<sub>2</sub> libre en est aussi révélatrice).

La teneur en matières en suspension est importante (eau de couleur grise).

L'eau est peu chargée en ions ( $\Sigma$ ions (mé/l) = 10,55 (la moyenne sur les 25 échantillons est de 46,1 mé/l) ; elle présente un déséquilibre ionique sans doute dû à la présence de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non dosé et toujours présent dans les eaux usées.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : ONDAINE

COMMUNE : LE CHAMBON-FEUGEROLLES

CONCESSION OU DIVISION : MONTRAMBERT

LIEU DE

PRELEVEMENT : Rue du MAQUIS, au niveau de la piscine du CHAMBON FEUGEROLLES

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 9h48

TEMPERATURE : 8,3°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,4	475	18,30	4,56	41,50	19,75	0,40	0,25	63,0	115,2	32,5	278,2	0	19	59	30	6	1400

**DESCRIPTION :**

L'échantillon présente une couleur gris clair ; la minéralisation totale et les matières en suspension restent cependant faibles malgré l'aspect pollué de l'eau.

De même, sachant que l'ONDAINE est le collecteur principal des eaux usées des communes de la RICAMARIE, le CHAMBON FEUGEROLLES et FIRMINY, on pourrait s'attendre à une DBO et une DCO plus élevées ; ces valeurs relativement faibles, sont liées au fait que l'ONDAINE présente un ruissellement naturel (eau de ruissellement du bassin versant) venant diluer les eaux usées.

L'échantillon présente un faible déséquilibre ionique, sans doute explicable par la présence de  $\text{NH}_4^+$  non dosé.

**REMARQUE :**

Le prélèvement a été fait en dehors des heures d'exhaure du puits PIGEOT (LA RICAMARIE) ; en effet pendant ces heures la minéralisation augmente ; la teneur en sulfate passe notamment à des valeurs de 500 à 600 mg/l.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : MALVAL

COMMUNE : LE CHAMBON FEUGEROLLES

CONCESSION OU DIVISION : MALAFOLIE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Pont de la RN88 sur le MALVAL

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 10h10

TEMPERATURE : 23,1°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
7,4	372	10,95	2,08	28,40	9,35	2,40	de0,05	31,00	36,80	30,50	126,9	0	124	133	37	6,2	2700

DESCRIPTION :

La température apparaît comme élément marquant de cet échantillon, elle s'explique par le fait que le prélèvement a été fait en période de rejet des eaux de refroidissement de la centrale du BEC (eaux en provenance de la LOIRE ou de l'ONDAINE).

Il s'agit là de l'un des échantillons les moins chargés Σ ions (mé/l) = 7,22.

En dehors des périodes de rejet de la centrale, les teneurs dans les différents éléments restent sensiblement semblables.

Cette eau peut être considérée, en dehors de sa température comme une eau de ruissellement typique de la région ne présentant pas de pollution d'origine minière ni organique.

TYPE :Eau de ruissellement

ORIGINE : ECHAPRE

COMMUNE : FIRMINY

CONCESSION OU DIVISION :MALAFOLIE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Pont de la RN88 sur l'ECHAPRE

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 10h30

TEMPERATURE : 7,3°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
7,05	294	6,30	1,52	20,40	4,25	0,25	de0,05	38,25	28,0	49,5	92,7	0	47,0	176	59	8,3	2500

## DESCRIPTION :

Echantillon très proche du précédent, représentant une eau de ruissellement typique de la région.

Cependant, la DCO proche de 200, le rapport  $\frac{DCO}{DDO}$  proche de 2, ainsi qu'un léger déséquilibre ionique dû à la présence de  $NH_4$ , révèlent une légère pollution organique. L'eau prélevée présente d'ailleurs une légère couleur grise.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : PATEUX (BORDE MATIN)

COMMUNE : FIRMINY

CONCESSION OU DIVISION : MALAFOLIE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Rue Michel RONDET

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 10h45

TEMPERATURE : 8,2°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
7,90	2200	89,0	19,4	100,0	145,0	4,95	1,95	250	640	305	1183,7	0	56	198	19,0	8,6	330

294

## DESCRIPTION :

Par bien des aspects cet échantillon se distingue des eaux de ruissellement non polluées.

- C'est le seul qui contienne du chlore et du  $\text{HCO}_3$  en si grande quantité.
- C'est l'individu le plus chargé ioniquement  $\Sigma \text{ions} (\text{m}\ddot{\text{e}}/\text{l}) = 68,8$
- Il présente un très important déséquilibre ionique (présence de  $\text{NH}_4^+$  en grande quantité)
- Le rapport  $\frac{\text{DCO}}{\text{DBO}}$  voisin de 10 révèle une inhibition de DBO liée à la présence de Fer et de Manganèse issus de la Mine par l'exhaure du puits CHANA et par le terril auprès duquel passe le ruisseau (le Fer précipite le Phosphore indispensable à la survie des bactéries, le Manganèse est toxique pour les bactéries).

Cette eau est polluée par 2 sources différentes qui sont d'une part l'eau d'exhaure du puits de la CHANA et d'autre part la décharge d'ordures ménagères située en amont et au travers de laquelle elle percole.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : ONDAINE

COMMUNE : FIRMINY

CONCESSION OU DIVISION : MALAFOLIE

LIEU DE  
PRELEVEMENT : Impasse du LAVOIR

DATE DE  
PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 11h

TEMPERATURE : 10,6°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,55	710	25,0	5,90	55,0	28,5	2,10	0,40	97,5	184	54	360,0	0	79	159	49	5,45	1050

DESCRIPTION :

Cet échantillon présente exactement le même faciès que l'échantillon n° 2 à la seule différence semble-t-il que la minéralisation totale et la température de l'ONDAINE augmentent vers l'aval compte tenu des différents rejets existant à tous les niveaux de la rivière.

Σions (mé/l) = 14,27 pour l'échantillon n° 2

Σions (mé/l) = 20,524 pour l'échantillon n° 6

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : ONDAINE

COMMUNE : UNIEUX

CONCESSION OU DIVISION : LA TOUR

LIEU DE

PRELEVEMENT : Rue Elisee RECLUS, 200 mètres en amont du Pont du SAUZE .

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 11h10

TEMPERATURE : 11,6°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	MES	DCO	DBO	O <sub>2</sub> diss.	ρ
7,4	770	31,75	4,64	86,0	27,0	3,65	1,45	83,5	146	80,5	283,1	0	76,0	135	52	6,05	1000

DESCRIPTION :

Cet échantillon a été prélevé à titre de comparaison avec le précédent afin de déterminer l'influence chimique de la résurgence d'eau de mine dans l'ONDAINE (division de la TOUR, échantillon n° 22).

Cette influence est peu perceptible ; on note cependant une augmentation du TH, du Fe et Mn témoins d'une influence minière.

La température continue à augmenter vers l'aval ; la teneur en sulfates ne varie pas (l'échantillon n° 22 présente une teneur en SO<sub>4</sub> faible pour une résurgence).

Le faciès général de l'eau ne varie pas.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : POMMARAISE

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : ROCHE LA MOLIERE

LIEU DE

PRELEVEMENT : au niveau de l'usine de produits chimiques (Laboratoire SEETAL)

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 10h

TEMPERATURE : 7°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	p
7,55	825,0	10,5	8,36	22,0	7,6	0,65	0,20	103	140	77,0	510,0	0	192,0	624,0	126,0	0,6	800

## DESCRIPTION :

L'échantillon prélevé apparaît relativement limpide, cependant on dénote un dépôt rouge dans le lit de la rivière, ce qui nous a suggéré de faire un prélèvement plus en amont (échantillon n° 24) afin de trouver l'origine de ce dépôt.

La charge ionique est moyenne pour une eau de ruissellement  $\Sigma$ ions (mé/l) = 19,63. La DCO et la DBO sont fortes ; le rapport  $\frac{DCO}{DBO}$  voisin de 5 révèle une pollution à caractère industriel. Parallèlement la DBO forte et le déséquilibre ionique important (présence de  $NH_4^+$ ) révèlent une pollution domestique.

Si l'on compare cet échantillon à l'échantillon n° 24 on note une diminution du TH, du Fe et du Mn, la disparition du  $CO_2$  libre (liée à l'apparition de pollution) ; le TAC, lui a nettement augmenté.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : PECHIER

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : ROCHE LA MOLIERE

LIEU DE

PRELEVEMENT : 50 mètres en amont de la station d'épuration

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 9h30

TEMPERATURE : 21,8°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,75	5760	180	14,68	338,0	200,0	5,70	7,40	957,0	2800	35,0	895	4,90	67,0	12,0	7,0	6,5	200

DESCRIPTION :

(Se reporter à l'échantillon 19).

Cet échantillon a été prélevé pendant les heures d'exhaure du puits du MARAIS (ROCHE LA MOLIERE) qui représente l'essentiel du débit du PECHIER ; le faciès est donc celui d'une eau de mine.

Il faut simplement noter l'augmentation de la DCO et la diminution du CO<sub>2</sub> libres toutes deux liées au déversement d'eaux usées domestiques dans le PECHIER.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : LIZERON

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : ROCHE LA MOLIERE

LIEU DE

PRELEVEMENT : 100 mètres en amont du pont du CD n°25 sur le LIZERON

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 10h30

TEMPERATURE : 12,4°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,8	5070	161	13,80	306	190	1,5	6,5	870,0	2300	42,0	842,0	0	6,0	22,0	12,0	3,9	200

DESCRIPTION :

Echantillon très semblable au précédent ; notons simplement que le CO<sub>2</sub> libre a disparu complètement et que la DCO et la DBO ont continué à augmenter.

Le PECHIER est en effet l'affluent principal du LIZERON.

TYPE : Eau de ruissellement

ORIGINE : EGOTAY

COMMUNE : SAINT ETIENNE (St VICTOR/LOIRE)

CONCESSION OU DIVISION : VARENNE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Lieu dit LAUMIERE

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 8h45

TEMPERATURE : 1,1°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
6,90	1095	49,8	7,12	103,0	49,0	1,3	1,0	91,0	360,0	85,0	434,4	24,45	72,0	341,0	120,0	0,9	700

300

## DESCRIPTION :

L'échantillon prélevé est légèrement coloré en brun gris ; la résistivité relativement faible et l'Extrait sec élevé témoignent d'une eau très chargée pour une eau de ruissellement.

Le rapport  $\frac{DCO}{DBO}$  proche de 2 montre une eau polluée par des effluents domestiques. Le déséquilibre ionique s'explique par l'absence de dosage de  $NH_4^+$  sans doute présent dans cette eau (l'EGOTAY est le collecteur des eaux usées de la Cité BEAULIEU (ROCHE LA MOLIERE)).

Il faut noter que cette eau présente du  $CO_2$  libre en général absent dans les eaux polluées.

TYPE : Eau de nappe superficielle

ORIGINE : Piezomètre

COMMUNE : FIRMINY

CONCESSION OU DIVISION :MALAFOLIE

LIEU DE  
PRELEVEMENT : Gare

DATE DE  
PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 8h

TEMPERATURE : 13,2°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
8,75	524,0	2,70	7,44	6,3	2,3	5,6	0,10	162,0	7,0	19,5	385,6	0	80,0	34,0	6,0	3,5	1600

DESCRIPTION :

La minéralisation de cette eau est relativement faible notamment le TH paraît exceptionnellement faible ainsi que la teneur en sulfates ; à l'inverse les teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  et en Na sont proportionnellement fortes de même que le PH.

L'échantillon prélevé est sale, coloré en brun.

Le caractère chimique de cette eau est étonnant pour la région ; ce même caractère apparaît pour les échantillons n°s 14 et 17 de provenance très différente (piézomètre cité DELAYNAUD, Exhaure CHANA) ; des analyses supplémentaires sont donc nécessaires pour déterminer l'origine de ce caractère.

TYPE : Eau de nappe superficielle

ORIGINE : Piezomètre

COMMUNE : FIRMINY

CONCESSION OU DIVISION : MALAFOLIE

LIEU DE  
PRELEVEMENT : Impasse du LAVOIR

DATE DE  
PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 8h15

TEMPERATURE : 11,7°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
6,95	420,0	16,0	3,84	36,0	16,0	24,0	0,90	58,0	74,0	42,0	234,3	19,55	62,0	20,0	13,0	1,9	1950

DESCRIPTION :

L'eau de ce piézomètre est sale, colorée en brun clair.

Elle présente le même caractère chimique que l'eau de l'ONDAINE.

Cependant, on peut noter une épuration de l'eau par les terrains traversés car cet échantillon présente une teneur en CO<sub>2</sub> libre absent dans l'ONDAINE, et ses valeurs de DCO et de DBO sont très nettement plus faibles.

TYPE : Eau de nappe superficielle

ORIGINE : Piezomètre

COMMUNE : LA RICAMARIE

CONCESSION OU DIVISION : LA BERAUDIÈRE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Cité DELAYNAUD, rue J. ROMEAS

DATE DE

PRELEVEMENT : 24 novembre 1983 à 9h15

TEMPERATURE : 11,5°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	MES	DCO	DBO	O <sub>2</sub> diss.	ρ
9,10	520,0	1,65	7,36	3,4	1,8	2,3	0	183	37,0	41,5	346,5	0	14,0	-de 10	4,0	4,4	1250

DESCRIPTION :

Cet échantillon présente le même caractère que le n° 12, à savoir :

- un PH élevé
- un TH et une teneur en SO<sub>4</sub> faibles
- des teneurs en Na<sup>+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> proportionnellement élevées.

Ce caractère est à confirmer par de nouvelles analyses.

TYPE : Eau de nappe superficielle

ORIGINE : Piezomètre

COMMUNE : SAINT ETIENNE

CONCESSION OU DIVISION : LA BERAUDIÈRE.

LIEU DE

PRELEVEMENT : Z.I. la CHAUVETIÈRE, rue Louis Joseph GRAS

DATE DE

PRELEVEMENT : 24 novembre 1983 à 8h15

TEMPERATURE : 12,0°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,35	360,0	21,5	1,64	47,0	17,0	9,7	0,45	15,0	122,0	9,5	100,0	5,5	24,0	-de10	4,0	3,0	2300

DESCRIPTION :

L'eau prélevée est propre, la minéralisation apparaît comme l'une des plus faibles de toutes les eaux prélevées.

Le profil de cette eau ressemble à celui des nappes superficielles de la ville de SAINT-ETIENNE avec une minéralisation d'ensemble plus faible.

TYPE : Eau de puits de mine

ORIGINE : Exhaure puits des COMBES

COMMUNE : LA RICAMARIE

CONCESSION OU DIVISION : LA BERAUDIÈRE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Lieu dit les COMBES

DATE DE

PRELEVEMENT : 24 novembre 1983 à 14h

TEMPERATURE : 22°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
7,95	1877,0	63,5	14,56	112,0	97,0	0,75	0,35	362,0	670,0	42,0	854,0	0	103,0	-de10	4,0	5,4	500

DESCRIPTION :

Cet échantillon, d'aspect relativement clair, présente toutes les caractéristiques d'une eau de mine typique, à savoir :

- une minéralisation totale beaucoup plus forte que celle des eaux de surface  $\Sigma$ ions (m $\bar{e}$ /l) = 58,8.
- un TH et un TAC très forts
- le chlore, par contre, reste à des valeurs semblables à celles des eaux de surface.
- le PH est relativement élevé.

TYPE : Eau de puits de mine

ORIGINE : Exhaure puits de la CHANA

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : LA VARENNE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Cite BEAULIEU, platre du puits CHARLES n°3

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 9h

TEMPERATURE : 21°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
8,95	570,0	2,65	6,80	4,30	2,60	11,0	0,15	148,0	9,8	32,5	351,4	0	138,0	38,0	5,0	3,1	1600

DESCRIPTION :

Cet échantillon présente différentes anomalies constituées notamment par une minéralisation totale exceptionnellement faible pour une eau de mine, de très faibles teneurs en calcium et magnésium et à l'inverse des teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Na}^+$  proportionnellement fortes.

Ces caractéristiques ne sont pas confirmées par des analyses faites en d'autres dates.

TYPE : Eau de puits de mine (eau stagnante)

ORIGINE : Puits des GRANGES n°3 cote 460,11m

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : LA VARENNE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Derriere le stade Louis BERGER

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 11h

TEMPERATURE : 14,9°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
6,95	3160	165,0	7,0	253,0	239,0	234,0	33,0	39,0	1200	18,5	427,0	53,75	746,0	62,0	6,0	5,8	500

DESCRIPTION :

Cet échantillon présente un faciès proche de celui d'une eau de mine "moyenne". Cependant les matières en suspension y sont abondantes (important dépôt rouge-brun au fond du flacon de prélèvement) et les teneurs en fer et manganèse importantes. Ceci étant certainement dû au fait qu'il s'agit là d'une eau stagnante.

Comme dans toute la division de VARENNE la teneur en Na est relativement faible.

TYPE : Eau de puits de mine

ORIGINE : Exhaure puits du MARAIS

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : ROCHE LA MOLIERE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Cite des ROCHERS

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 10h15

TEMPERATURE : 25,2°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
6,90	5730	180,0	14,68	336,0	200,0	8,3	7,6	997,0	2800	35,0	895,0	178,40	41,0	-de10	5,0	3,9	200

DESCRIPTION :

Eau de mine typique par sa minéralisation totale importante et son profil général. La division de ROCHE LA MOLIERE se distingue de sa voisine (VARENNE) par des teneurs en Na importantes.

TYPE : Eau de puits de mine

ORIGINE : Exhaure puits PIGEOT

COMMUNE : LA RICAMARIE

CONCESSION OU DIVISION : MONTRAMBERT

LIEU DE  
PRELEVEMENT : Rue Remi MOÏSE

DATE DE  
PRELEVEMENT : 24 novembre 1983 à 11h30

TEMPERATURE : 28°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
8,15	1890	51,0	14,96	72,0	71,0	1,1	0,15	435,0	600,0	54,5	825,0	0	36,0	-de 10	6,0	7,4	200

DESCRIPTION :

Eau de mine typique.

Le TH faible par rapport au TAC (TH ≈ 10 mé/1 ; TAC ≈ 15 mé/1) révèle une origine profonde de l'eau.

L'absence de CO<sub>2</sub> libre, normalement présent dans les eaux du fond s'explique par le fait que l'échantillon a été prélevé dans les bassins de décantation de la mine ; bassins dans lesquels le CO<sub>2</sub> s'échappe en surface pendant la période de stagnation.

TYPE : Eau de nappe superficielle

ORIGINE : Drainage du tunnel SNCF de la CROIX DE L'ORME

COMMUNE : LA RICAMARIE

CONCESSION OU DIVISION : LA BERAUDIÈRE.

LIEU DE

PRELEVEMENT : Sortie du tunnel à LA RICAMARIE

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 9h15

TEMPERATURE : 7,7°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,8	679,0	30,75	2,76	90,0	21,20	0,90	de0,05	60,0	219,2	65,0	168,4	0	40,0	19,0	9,0	9,4	1200

DESCRIPTION :

Eau très limpide, de minéralisation totale relativement faible.

Cet échantillon ne présente aucun élément marquant ; il s'agit là d'une eau de pluie ayant transité un temps relativement court dans des terrains superficiels de la série carbonifère.

TYPE : Eau de resurgence

ORIGINE : Resurgence dans l'ONDAINE

COMMUNE : UNIEUX

CONCESSION OU DIVISION : LA TOUR

LIEU DE

PRELEVEMENT : Rue Elisee RECLUS, 250 mètres en amont du pont du SAUZE

DATE DE

PRELEVEMENT : 16 novembre 1983 à 12h

TEMPERATURE : 15,9°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
6,80	1190	78,25	12,60	151,0	90,0	3,25	1,75	93,5	260,0	54,5	768,8	82,5	11,0	6,0	4,0	3,9	700

DESCRIPTION :

Nous avons constaté la présence d'une résurgence dans le lit de l'ONDAINE rue Elisée RECLUS à UNIEUX (division de la TOUR), cette résurgence, visible uniquement à l'étiage, laisse un dépôt rouge brun typique d'une résurgence minière.

L'analyse chimique et la température confirment l'origine de cette eau de qualité très semblable à celle des résurgences stéphanoises à la seule différence que la teneur en sulfates y est plus faible ce qui semble s'expliquer par le fait que la division de la TOUR est une division très ancienne d'une part et que les travaux y étaient peu profonds d'autre part.

TYPE : ?

ORIGINE : Drainage Fendue des EGASSONS

COMMUNE : LA RICAMARIE

CONCESSION OU DIVISION : LA BERAUDIERE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Sortie de la fendue au pied du terril actuel

DATE DE

PRELEVEMENT : 24 novembre 1983 à 10h

TEMPERATURE : 5,6°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
6,70	6506	332	3,76	505	475,0	41,0	35,0	365,0	3500	33,5	229,4	110,0	365,0	102,0	9,0	5,4	250

312

## DESCRIPTION :

La fendue des EGASSONS, située sur le territoire de la concession de MONTRAMBERT mais issue des travaux de la BERAUDIERE, se situe au pied du terril actuel des houillères.

Il existe actuellement un écoulement d'eau à partir de cette fendue déposant un matériau rouge brun. L'analyse chimique de cette eau montre qu'il s'agit là d'une eau de surface (TAC faible) chargée en Fer; Manganèse et Sulfates par le fait qu'elle transite au travers du terril tout proche (cf : page 6 "Le problème des eaux dans le quartier du CLAPIER" Philippe DAVOINE 1983).

L'importance de la DCO s'explique par le pouvoir réducteur du fer présent en grande quantité dans cette eau.

TYPE : Eau de ruissellement (?)

ORIGINE : POMMARAISE

COMMUNE : ROCHE LA MOLIERE

CONCESSION OU DIVISION : ROCHE LA MOLIERE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Lieu dit l'ESSARTERIE

DATE DE

PRELEVEMENT : 23 novembre 1983 à 12h

TEMPERATURE : 4,5°C

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	$\rho$
6,80	520,0	33,4	4,72	56,00	39,0	8,4	1,1	29,0	80,0	70,0	288,0	83,10	38,0	del10	7,0	5,9	1450

313

DESCRIPTION :

Le lit de la POMMARAISE présente sur une grande partie de sa longueur un dépôt rouge brun (échantillon 8) dont il fallait déterminer l'origine.

L'explication se trouve dans la découverte d'une petite résurgence d'origine sans doute minière (présence de Fe et Mn) en amont de la rivière au lieu dit VILLEBOEUF (commune de ROCHE LA MOLIERE).

Il est difficile, sinon impossible d'analyser cette résurgence dans la mesure où elle apparaît au sein même des eaux de la rivière. On peut simplement noter que la température de cette eau est plus élevée que celle de la rivière (au droit de la résurgence la température de l'eau est de 10°C environ) qu'elle laisse un dépôt rouge brun dès son apparition et qu'apparaissent des teneurs en Fe et Mn dans la rivière en aval de cette résurgence (échantillon n° 24 comparé au n° 8).

Cette résurgence apparaît au droit même de la faille de DOURDEL MONTSALON créant sans doute une isolation locale de vieux travaux proches de la surface dans le secteur de VILLEBOEUF.

TYPE : Eau de nappe superficielle + eau de ruissellement

ORIGINE : Eau de drainage souterrain autoroute

COMMUNE : FIRMINY

CONCESSION OU DIVISION : MALAFOLIE

LIEU DE

PRELEVEMENT : Souterrain autoroute A47, salle des pompes

DATE DE

PRELEVEMENT : 24 novembre 1983 à 8h15

TEMPERATURE :

PH	E.S.	TH	TAC	Ca	Mg	Fe	Mn	Na	SO4	Cl	HCO3	CO2	MES	DCO	DBO	O2diss.	ρ
7,90	870,0	48,0	3,60	112,0	41,0	0,85	0	68,0	235,0	134,5	219,6	0	4,0	-de10	4,0	7,6	900

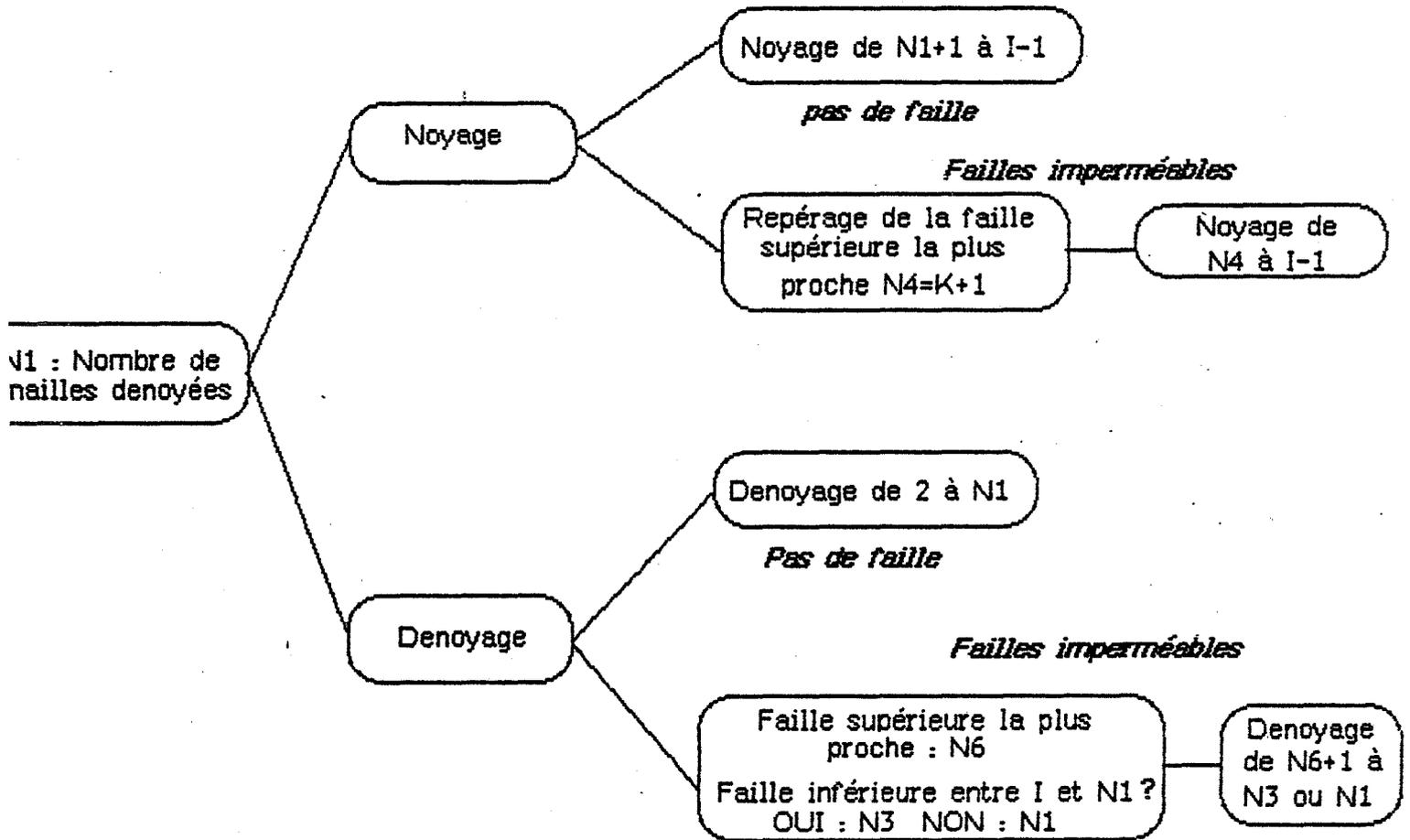
DESCRIPTION :

Eau limpide de minéralisation moyenne, ne présentant pas de déséquilibre ionique ni d'élément marquant.

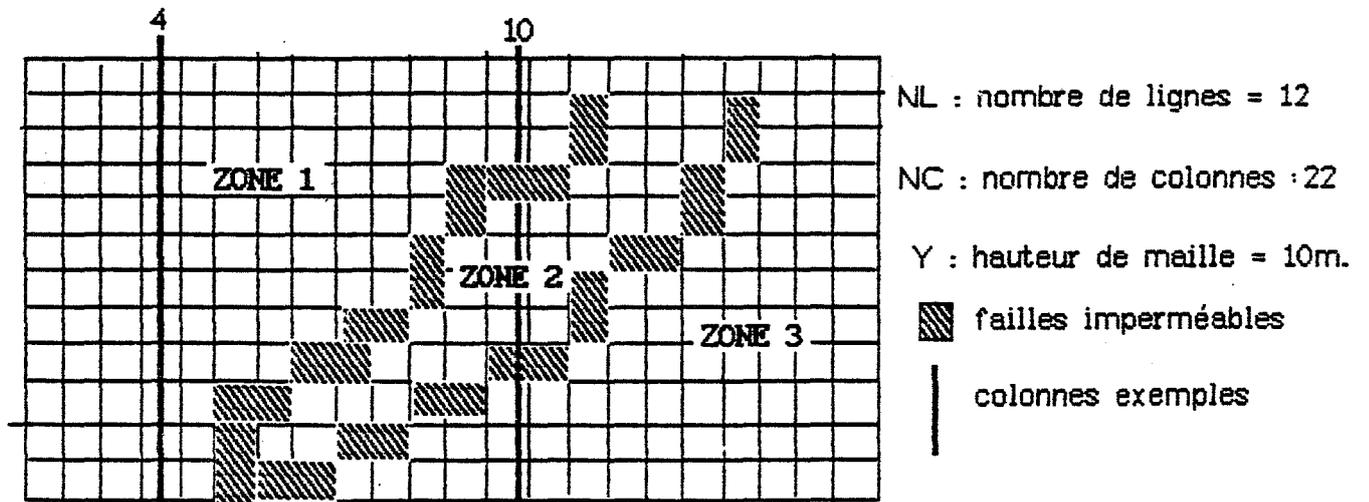
ANNEXE N°7

PROCESSUS DE NOYAGE/DENOYAGE

# PROCESSUS DE NOYAGE/DENYOYAGE



Exemple de maillage



Le maillage présenté comporte 3 zones indépendantes séparées par des failles imperméables. Le niveau de l'eau dans ces trois zones est indépendant, nous allons prendre pour exemple les colonnes 4 et 10.

colonne n°4

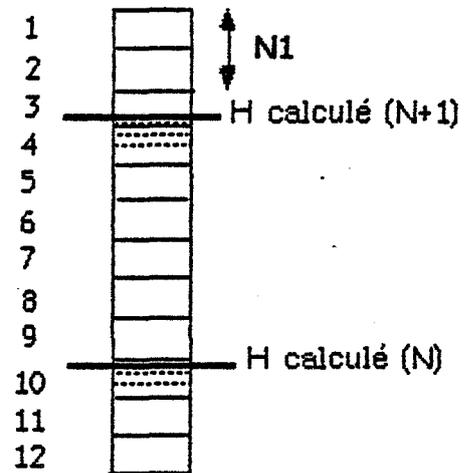
### Noyage

A l'itération N, la maille I = 10 était la dernière maille noyée. Après l'itération N+1 le nouveau H calculé est égal à : 92 m.

$$N1 = NL - 1 - \text{INT}(H/Y + 0.5) = 2$$

Le nombre de mailles dénoyées est inférieur au n° de la maille calculée ; cela signifie qu'il faut attribuer aux mailles comprises entre N1+1 et I-1 la valeur de H calculée.

Le niveau de l'eau se retrouve donc dans la maille n°3.

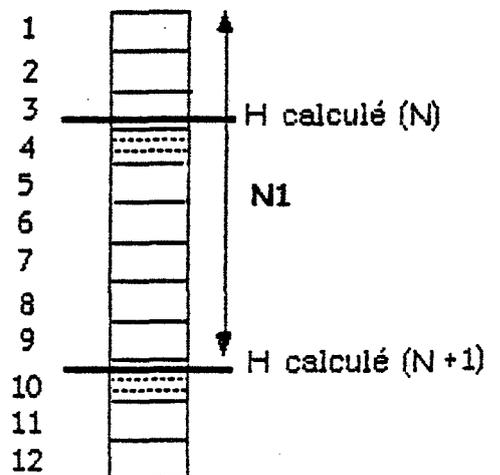


### Denoyage

A l'itération N, la maille I = 3 était la dernière maille noyée. Après l'itération N+1 le nouveau H calculé = 32 m.

N1 = 9 donc le niveau de l'eau ne dépasse pas la maille n° 10. cela signifie que les mailles 2 à N1 doivent être dénoyées.

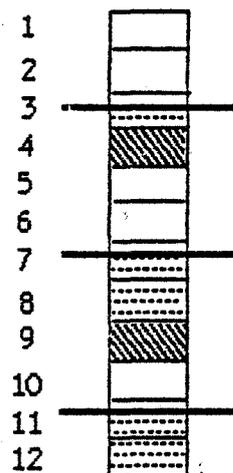
$$H(I,J) = 0 \text{ pour } I = 2 \text{ à } 9$$



**Colonne 10**

La colonne 10 présente la particularité de recouper les deux failles imperméables qui scindent notre domaine en trois zones indépendantes.

A l'itération N les mailles n°3 (H = 89), n°7 (H = 47) et n° 11 (H = 14) sont chacune la dernière maille noyée de la zone à laquelle elles appartiennent.



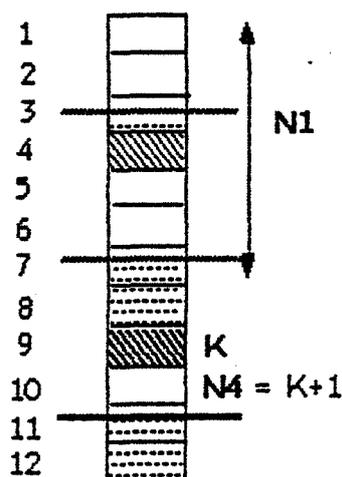
**Itération N + 1**

Maille n° 11 : Nouveau H calculé = 42 m. soit  $N1 = 7$

Il faudrait donc noyer les mailles n°10 à n°8

La maille n°9 étant imperméable, la remontée est bloquée à la maille n° 10 .

Noyage de I-1 à N4

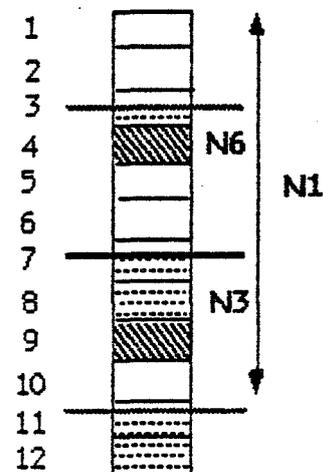


Maille n°7 : Nouveau H calculé = 16 m. soit  $N1 = 10$

Il faudrait donc dénoyer de la ligne n°2 à la ligne n° 10 .

La maille traitée (n°7), étant située entre deux mailles imperméables, le processus ne peut s'appliquer que dans cet intervalle.

Dénoyage des mailles 5 à 8.



ANNEXE N°8

LES DONNEES DE LA COUPE

EST-OUEST

























ANNEE : 1985

NOM DE L'AUTEUR (Prénom) : BLACHERE Agnès

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC (MONTPELLIER II)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

RESUME :

Dans un premier tome, l'auteur étudie les impacts géologiques, hydrogéologiques et chimiques de l'arrêt de l'exhaure minière dans les dernières concessions exploitées dans le bassin houiller de la Loire.

Cette étude permet de définir une stratégie de surveillance de la remontée du niveau d'eau et de déterminer le taux d'agressivité des eaux d'émergences vis-à-vis des bétons. Plusieurs solutions techniques sont aussi envisagées en cas d'apparition d'émergences dans l'ensemble des concessions.

Le deuxième tome de cet ouvrage est consacré à la modélisation assistée par ordinateur du milieu. L'auteur a mis au point un logiciel utilisant la méthode des différences finies, pour une modélisation en coupe du milieu qui permet de simuler la remontée du niveau de l'eau. L'outil mis au point peut être transposé et adapté à tout site du même type.

MOTS-CLES :

EXHAURE

MINES

CHARBON

HYDROGEOLOGIE

CHEMIE DE L'EAU

BETONS

MODELE MATHEMATIQUE

SIMULATION

DIFFERENCES FINIES

COUPE